جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره دهم، تابستان ۱۳۹۳

صص ۳۵-۱

نقش الگوهای گردش مقیاس منطقه‌ای جو بر وقوع روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد

سلیمان صادقی- استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
عبّاس مفیدی[1]- استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
مهین جهانشیری- دانش آموخته کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
رضا دوستان- استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۱۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۳/۱۲

چکیده

به منظور شناسایی نقش الگوهای گردش منطقه‌ای جو در بروز روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد از یک روش تحلیل همدید ترکیبی استفاده شد. برای انجام پژوهش، چهار دسته داده، شامل داده‌های ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا، داده‌های رقومی جوی، داده‌های ایستگاه جو بالا و خروجی‌های مدل *HYSPLIT* مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از شاخص استاندارد آلودگی هوا (*PSI*)، کیفیت هوا برای شهر مشهد در یک دوره ۷ ساله (۱۳۹۰-۱۳۸۴) مورد بررسی قرار گرفت و روزهای بسیار آلوده (*PSI* >۲۰۰) شناسایی شد و با کاربست تؤامان تحلیل همدید دستی، ردیابی پسگرد ذرات معلق و بررسی شرایط ترمودینامیک جو مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج بررسی بیانگر آن است که روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد در قالب چهار الگوی گردشی اصلی شامل: الگوی ترکیبی پرفشارسیبری-پشته جنب حاره ای، پرفشار مهاجر، پشته جنب حاره‌ای و الگوی کم فشار برون حاره، قابل طبقه‌بندی می‌باشند. در الگوی ترکیبی پرفشار سیبری-پشته جنب حاره‌ای، شکل گیری همزمان یک لایه وارونگی دمایی کم ضخامت در ترازهای زیرین جو و لایه وارونگی دیگری در وردسپهرمیانی، نقش تؤامان پرفشار سیبری و پشته جنب حاره‌ای را در افزایش آلودگی هوا نمایان می سازد. در الگوی پرفشار مهاجر، به واسطه استقرار پشته ای قوی در محدوده کوه‌های اورال- دریای خزر در وردسپهر میانی و شکل‌گیری یک مرکز گردش واچرخندی در حدفاصل دریای خزر تا بخش های شمالی خراسان در وردسپهر زیرین، شاهد ظهور همزمان چند لایه وارونگی کم ضخامت در نیمرخ قائم جو هستیم. الگوی پشته جنب حاره ای، الگویی برجسته از تیپ وارونگی فرونشستی را تنها در دوره گرم سال به نمایش می گذارد. در مقابل، در الگوی کم فشار، بروز روزهای بسیار آلوده، ناشی از توان جو در برداشت، انتقال و پخش گردوغبار و ذرات معلق است که بواسطه ناپایداری و صعود گسترده هوا به همراه عدم تغذیه رطوبتی مناسب در سامانه‌های چرخندی عبوری حاصل می گردد.

کلیدواژه‌ها: آلودگی هوا، روزهای بسیار آلوده، شاخص *PSI*، گردش منطقه ای جو، مدل *HYSPLIT*، مشهد.

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۵۱۳-۸۷۹۶۸۳۲ Email : abbasmofidi@um.ac.ir

۱. مقدمه

آلودگی هوا یکی از مسائل و مشکلات مهم، دائمی و تأثیرگذار در زندگی شهری است که گستردگی و شدت و ضعف آن تابعی از نحوه ترکیب و عملکرد عوامل انسانی و طبیعی در فضای پیچیده با هویت شهری است. این بدان معنی است که ساختار و ویژگی های محلی آلودگی هوا در یک شهر، از یک سو متأثر از فعالیت های انسانی و انرژی های مصرف شده ناشی از تمرکز و تراکم بالای جمعیت شهری و از سوی دیگر به نظام طبیعی حاکم بر منطقه، بویژه ساختار فیزیوگرافی و گردش منطقه ای و محلی جو وابسته است. بر همین اساس، پیدایش آلودگی هوا در فضای شهری و میزان شدت و گستردگی مکانی آن تنها با لحاظ نمودن شیوه زندگی شهروندان، رفتار جامعه شهری و نوع و کیفیت فعالیت های انسانی قابل تبیین نبوده، بلکه برای هر مرکز فعالیت شهری آلوده، ترکیب پیچیده ای از عوامل طبیعی و انسانی در تعیین ویژگی ها و ساختار محلی و منطقه ای آلودگی هوا نقش بازی می کند. در این میان، ظهور روزهای بسیار آلوده همراه با شرایط آلودگی بحرانی از خصوصیات بارز کلان شهرها می باشد،که با اثرات منفی بسیارگسترده برای ساکنین این شهرها و بطور کلی محیط زیست شهری همراه است. بروز آلودگی های حدّی در هوای شهری و ظهور شرایط بحرانی در غلظت آلاینده های جوی، پدیده ای است که در چند سال اخیر به دفعات درکلان شهرهای ایران بوقوع پیوسته و اثرات منفی گسترده ای را در پی داشته است. اگرچه تعیین میزان دقیق خسارت وارده ناشی از افزایش آلودگی هوا درکلان شهرهای کشور به جهت کمبود اطلاعات و داده ها کار بسیار دشواری است، اما گزارشات موجود، نشان از اثرات مخرب بسیار بالا و آسیب های گسترده ی این پدیده در محیط شهرهای آلوده کشور دارد. مرگ بیش از ٤٤٥٠ نفر در کلان شهر تهران منتسب به افزایش آلودگی ها و روزهای بسیار آلوده در سال ۱۳۹۰ (سایت تابناک، ۱۳۹۱)، از نمونه اثرات مخرب آلودگی های بحرانی هوا در کلان شهرهای ایران است. در عین حال، قرارگیری تعداد چهار شهر کشور در لیست ده شهر نخست آلوده جهان در سال ۲۰۱۱ (سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۱۱)، از وخامت کیفیت هوا در کلان شهرهای ایران حکایت می کند.

در بررسی مطالعات اقلیمی مربوط به آلودگی هوای شهری، برخی از پژوهش ها تیپ بندی همدید الگوهای گردش جو را اساس بررسی های خود قرار داده اند (هایدورن و یاپ، ۱۹۸٦؛ کالکشتاین و کوریگان، ۱۹۸٦؛ دیویس و کالکشتاین، ۱۹۹۰؛ کومری، ۱۹۹۰؛ کومری و یارنال، ۱۹۹۲؛ مک گرئگور و بامزیلیس، ۱۹۹۵؛ شاهگدانوآ و همکاران، ۱۹۹۸؛ چن و همکاران، ۲۰۰۷؛ فلوکاس و همکاران، ۲۰۰۹؛ دیویس و همکاران، ۲۰۱۰). این دسته از مطالعات، از دو رهیافت اصلی جهت مطالعه آلودگی هوای شهری استفاده نموده اند. در رهیافت اول، اساس مطالعات بر تحلیل دستی (*Subjective*) روابط بین آلاینده های شهری و تیپ های همدید، بنا نهاده شده است. در رهیافت دوم از روش های تحلیل کمّی(*Objective*) جهت انجام پژوهش ها استفاده شده است. علاوه بر دو رهیافت اولیه یادشده، در سال های اخیر و در راستای فراهم نمودن درک عمیق تری از روابط بین الگوهای گردش جو و آلودگی هوای شهری، روش های تکامل یافته تری موسوم به «روش های ترکیبی» نیز مورد استفاده برخی

پژوهشگران قرار گرفته است. موضوع تحقیق حاضر ایجاب می کند تا مروری هرچند مختصر از نتایج پژوهش های انجام شده در چارچوب سه رهیافت فوق ارائه گردد.

در بررسی ارتباط بین تیپ های همدید و آلودگی هوای شهری، در یک ارزیابی کلی از پژوهش های انجام شده، مدل چرخندکلاسیک برون حاره، با برخی ملاحظات محلی، اساس طبقه بندی همدید را شکل می دهد (کومری و یارنال، ۱۹۹۲). رهیافت یاد شده بطور موفقی برای کل و یا بخش هایی از آمریکای شمالی (دیویس و کالکشتاین، ۱۹۹۰؛ کومری، ۱۹۹۰؛ کومری و یارنال، ۱۹۹۲؛ شوارزوف و رید، ۲۰۰۰)، انگلستان (مک گرئگور و بامزیلیس، ۱۹۹۵؛ بیکر، ۲۰۱۰)، مسکو (شاهگدانوآ و همکاران، ۱۹۹۸)، چین و تایوان (چن و همکاران، ۲۰۰۱؛ چن و همکاران، ۲۰۰۸؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۰)، هنگ کنگ (یوآن و همکاران، ۱۹۹۸)، فلسطین اشغالی (دایان و لوی، ۲۰۰۲)، آتن (سیندوسی و همکاران، ۲۰۰۳) و بسیاری از مناطق شهری جهان به کار گرفته شده است. پژوهشگران درکاربست این رهیافت بر این باورند که گردش جو در مقیاس همدید از عوامل اصلی تعیین میزان تغییرات و وردایی های روزانه آلاینده های هوای شهری به شمار می آید (کومری و یارنال، ۱۹۹۲). برای مثال کومری و یارنال (۱۹۹۲) تلاش نمودند تا روابط بین تیپ های همدید (گردش اتمسفری) و تغییرات میزان ازن سطحی را در منطقه شهری پیتزبورگ در ایالت پنسیلوانیا مورد بررسی قرار دهند. کومری و یارنال در این مطالعه ابتدا با بهره گیری از نقشه های هوای روزانه در تراز دریا تیپ های همدید را برای یکدوره ده ساله (۱۹۸۷–۱۹۷۸) استخراج نمودند. این مرحله به روش دستی (*Subjective*) به انجام رسید و حاصل آن استخراج ۹ تیپ همدید برای بیش از ۹۵٪ از روزهای مورد مطالعه بوده است. در انجام مطالعه ۵ تحلیل گر نقشه، بطور همزمان تمامی روزهای دوره مطالعه را مورد بررسی قرار دادند. از دیگر پژوهش هایی که روابط بین تیپ های همدید و آلاینده های شهری را به روش دستی مورد بررسی قرار داده اند، می توان به مطالعه کیم و همکاران (۲۰۰۵) اشاره نمود. ایشان با این اعتقاد تیپ های همدید مرتبط با تغییرات غلظت ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در منطقه نیوانگلند (شمال شرق آمریکا) را استخراج نمودند،که تحلیل دستی نقشه های هوا در قیاس با تکنیک های آماری (*Objective*)، تشخیص دقیق تر، همراه با درکی عمیق تر از شرایط جوی و تیپ های همدید برای دوره های آلوده را فراهم می آورد. در واقع سادگی در تعیین تیپ های همدید، بواسطه تبیین دیداری آسان نقشه های هوا، مزیت اصلی است که کیم و همکاران در ترجیح روش دستی بر تکنیک های آماری عنوان نموده اند. نتایج بیانگر آن است که در شمال شرق آمریکا (نیوانگلند)، بیشینه تجمع ذرات معلق ($PM_{2.5}$)، در پی استقرار یک تیپ همدید خاص، موسوم به «تیپ برگشتی از اقیانوس اطلس» بوقوع می پیوندد. دایم و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی، ارتباط بین غلظت های بالای ازن سطحی و الگوهای گردش در ترازهای میانی جو را برای کلانشهر آتلانتا در ایالت جورجیا مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه نیز ابتدا تیپ بندی همدید به روش دستی برای فصل تابستان استخراج گردید. سپس روزهای با غلظت ازن بالا در دوره مذکور استخراج و در مرحله سوم ارتباط بین تیپ های همدید و روزهای با غلظت بالای ازن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نویسندگان

مقاله دلیل بکارگیری روش دستی و ترجیح آن بر روش های تیپ بندی آماری را بدین شکل عنوان نموده اند که روش های دستی دیدی عمیق تر، همراه با باریک بینی و دقت بیشتر را فراهم می آورند، این در حالی است که در روش های تیپ بندی آماری امکان از دست رفتن و یا پنهان ماندن این جزئیات وجود دارد (یارنال و همکاران، ۲۰۰۱). در عین حال تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از این جهت که دارای پیچیدگی کمتر و سهولت در تیپ بندی است و علاوه بر آن ارتباط تنگاتنگی با ترازهای زیرین و شرایط جوی سطحی دارد بر تراز دریا ترجیح داده شد.

در مقابل، حجم مطالعاتی که با روش های تحلیل کمی ارتباط بین گردش جو و آلودگی هوای شهری را مورد بررسی قرار داده اند، بسیار بیشتر است. در این میان می توان به بررسی های کالکشتاین و کوریگان (۱۹۸٦)، اوهر و ویلبای (۱۹۹۵)، شاهگدانوآ و همکاران (۱۹۹۸)، کومری (۱۹۹٦)،گرین و همکاران (۱۹۹۹)، تورنر و لا (۲۰۰۱)، نیلسن و همکاران (۲۰۰۱)، و وانگ و همکاران (۲۰۱۰) اشاره نمود. در بررسی آلودگی هوای شهری با روش های تحلیل کمی، عمده تیپ بندی های همدید با بکارگیری تکنیک های آماری خاصی چون تحلیل همبستگی، تحلیل خوشه ای و تحلیل مؤلفه های اصلی، بطور ترکیبی و یا مجزا به انجام رسیده است. برای مثال کالکشتاین و کوریگان (۱۹۸٦) تمرکز دی اکسید گوگرد را در ناحیه ویلمینگتن از ایالت دلاوِر (*Delaware*) با استفاده از یک شاخص اقلیم شناسی همدید بررسی نموده اند. آنها با استفاده از ۷ متغیر هواشناسی سطحی و با بهره گیری از تحلیل مؤلفه های اصلی و تحلیل خوشه ای تعداد ۱۰ تیپ هوای سطحی برای روزهای آلوده تعیین نمودند. نتایج پژوهش بیانگر آن است که بالاترین میزان غلظت دی اکسید گوگرد با استقرار واچرخندهای مهاجر و انتقال از تیپ هوای قاره ای- قطبی به تیپ اقیانوسی همراه بوده است. همچنین نویسندگان مدعی شدندکه رهیافت همدید یاد شده توانایی آن را دارد که در تعیین روندهای درازمدت آلودگی هوا، سهم تغییرات ناشی از پخش محلی آلاینده ها و انتشار ناشی از الگوهای جوی را آشکار سازد. گرین و همکاران (۱۹۹۹) از یک شاخص همدید کمّی، موسوم به «شاخص همدید زمانی» (*Temporal Synoptic Index*)، برای ارزیابی اثرات جو بر مقادیر ازن و ذرات معلق استفاده نمودند. در این مطالعه پژوهشگران از داده های چهار شهر آمریکا که در مناطق اقلیمی متفاوتی استقرار یافته اند بهره جستند. روش شناسی این پژوهش بر این فرض اولیه استوار گشته،که پدیده های محیطی (از جمله آلودگی هوا) به مجموعه ای از متغیرهای جوی که بصورت ترکیبی (و نه مجزا) عمل می کنند، واکنش نشان می دهند. بنابراین، انسان و پدیده های محیطی به کل جو به عنوان یک مجموعه (*Umbrella of air*) – و نه یک عنصر از آن– واکنش نشان می دهند. بر این اساس، اثر ترکیبی و یکپارچه عناصر متعدد بیش از مجموع اثراتی است که هریک از این عناصر بطور مجزا خواهند داشت. به همین علت در مطالعه یادشده، جهت تعیین تیپ همدید برای هریک از روزهای آلوده، ٦ عنصر جوی بطور ترکیبی و توامان مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج پژوهش نشان داد که تفاوت آشکاری در بار آلودگی شهرها در زمان تسلط الگوهای همدید مختلف مشاهده می گردد. اگرچه روش های تحلیل کمّی، پردازش داده های حجیم را آسان نموده و ظرف زمانی پردازش ها را بسیارکوتاه ساخته است و در عین حال از کارکرد سلیقه ای که در

روش دستی تیپ بندی همدید مشاهده می گردد، مبرّاست، اما برخی از پژوهشگران در پی فراهم نمودن درکی عمیق تر همراه با جزئیات بیشتر از ارتباط بین آلودگی هوای شهری و الگوهای گردش جو، درصدد استفاده از روش های ترکیبی برآمده اند. از این دست مطالعات می توان به پژوهش های کالکشتاین و همکاران (۱۹۹٦)، دیویس و همکاران (۲۰۱۰)، هو و همکاران (۲۰۱۰) و ساندو (۲۰۱۱) اشاره نمود. برای مثال دیویس و همکاران (۲۰۱۰) برای تبیین وردایی روزانه مقادیر ازن سطحی در دره ای واقع در ایالت ویرجینیا از یک روش ترکیبی استفاده نموده اند. در این پژوهش علاوه بر بکارگیری روش«طبقه بندی همدید فضایی» (شریدن،۲۰۰۲)، از ردیابی پسگرد ذرات معلق نیز استفاده شد. نتایج تحقیق بیانگر آن است که روش ترکیبی یادشده، نتایجی کامل تر و دقیق تر را در قیاس با بکارگیری مجزای هریک از روش های فوق در پی خواهد داشت. بکارگیری روش ترکیبی، بخصوص در تعیین منشأ آلودگی های کوتاه مدت (مقیاس روزانه)،کارایی بالایی را از خود نشان داده است.

ارزیابی کلی پژوهش هایی که ارتباط بین الگوهای همدید و آلودگی هوای شهری درکلان شهرهای ایران را مورد بررسی قرار داده اند حکایت از آن دارد که بخش اعظم آنها به روش تحلیل دستی به انجام رسیده اند. اگرچه در موارد معدودی از روش های تحلیل کمی جهت شناسایی روابط بین آلودگی هوای شهری و تیپ های همدید استفاده شده است (علیجانی، ۱۳۸۲؛ ۱۳۸٤؛ انتظاری، ۱۳۸٤؛ کریمی، ۱۳۹۱)، اما به نظر می رسد نبود داده های مناسب و کوتاه بودن دوره آماری آلاینده های شهری و به تبع آن تعداد محدود روزهای ثبت شده با میزان آلودگی بالا، میل به بررسی دوره های کوتاه و تحلیل به روش دستی را بر روش های تحلیل کمّی رجحان بخشیده است. عمده پژوهش ها، در تحلیل همدید آلودگی هوا، استقرار یک سامانه واچرخندی برون حاره و یا تسلط یک پشته در ترازهای میانی وردسپهر را علت اصلی افزایش آلاینده های شهری درکلانشهرهای مختلف ایران ذکر نموده اند (علیجانی، ۱۳۸۲؛ ۱۳۸٤؛ انتظاری، ۱۳۸٤؛ صفوی و علیجانی، ۱۳۸۵؛ لشکری و هدایت، ۱۳۸۵؛ قسامی و همکاران، ۱۳۸٦؛ عزتیان، ۱۳۸٦؛ حجازی، ۱۳۸۷؛ رنجبر و محمدیان، ۱۳۸۹؛ جهانشیری، ۱۳۸۹؛ حسین پور، ۱۳۹۰؛ عطائی و هاشمی نسب، ۱۳۹۰؛ سعادت آبادی، ۲۰۱۲؛ ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۳). مروری بر پژوهش های انجام شده، بیانگر آن است که یک برنامه مدون و سازمان یافته جهت شناسایی جنبه های مختلف آلودگی هوای شهری درکشور وجود ندارد و تحقیقات انجام شده به صورت جزیره ای و بر اساس علایق شخصی پژوهشگران به انجام رسیده اند. در این میان، علیجانی (۱۳۸۲؛ ۱۳۸٤) با استفاده از روش های تحلیل کمّی به شناسایی تیپ های همدید مؤثر بر آلودگی هوای تهران پرداخت. ایشان در بررسی های خود با بهره گیری از تحلیل خوشه ای و تحلیل مؤلفه های اصلی، تعداد ٦ تیپ همدید برای روزهای آلوده ی شهر تهران استخراج نمود. نتایج بیانگر آن است که عمده روزهای آلوده شهر تهران به ماه های پاییزی تعلق داشته و در عین حال، تیپ های گردش واچرخندی (تیپ های مداری و واچرخند مهاجر) بیش از سایر تیپ های گردشی در بروز روزهای آلوده نقش ایفاء نموده اند. انتظاری (۱۳۸٤) نیز در بررسی مشابهی که با بهره گیری از روش های تحلیل کمّی، برای یکدوره ۵ ساله (۱۳۸۲–۱۳۷۸) به انجام رسید،

نقش تیپ های گردش واچرخندی را در بروز آلودگی هوای شهر تهران بسیار برجسته دانسته است. نتایج تحقیق بیانگر آن است که از میان چهار تیپ گردش اصلی استخراج شده، تیپ های گردش مداری (تیپ گردش واچرخندی) و پرفشار سیبری بیش از سایر تیپ های گردش در ایجاد آلودگی نقش ایفاء می کنند. قسامی و همکاران (١٣٨٦) دوره های بحرانی آلودگی هوای شهر تهران را ناشی از استقرار سامانه های واچرخندی برون حاره دانسته اند. نتایج این پژوهش بر اساس تحلیل نقشه های هوا برای یک دوره یک ساله بدست آمد. در پژوهش دیگری، بیدختی و شرعی پور (١٣٨٨) به بررسی نقش شرایط هواشناختی ترازهای بالای جو بر وقوع روزهای دارای آلودگی حاد در شهر تهران پرداختند. یافته ها حکایت از آن دارد که محور جت جنب حاره نقش مهمی در بروز بیشینه و کمینه آلودگی هوا در شهر تهران دارد. بدین ترتیب که در روزهای آلودگی حاد، محور جت جنب حاره امتدادی نصف النهاری به خود گرفته و در ترازهای فوقانی و میانی جو با استقرار پشته ای بر روی منطقه همراه می شود. در مقابل، در روزهای کمینه آلودگی، جت با استقرار ناوه ای بر روی خاورمیانه همراه گشته و در امتداد مداری گسترش می یابد. نکته دیگر آن که، آلودگی های حادِ شهر تهران در درجه اول به افزایش غلظت ذرات معلق (PM_{10}) مربوط می شود.

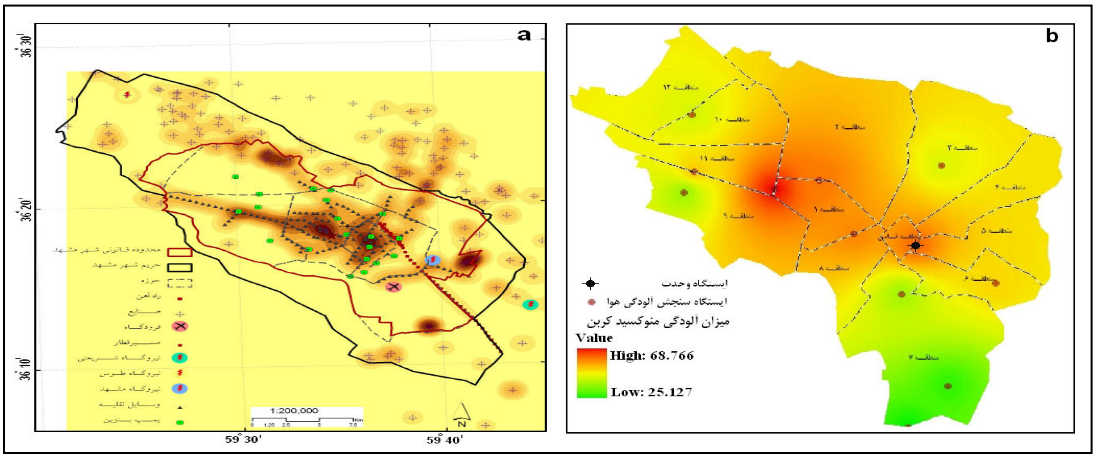
بررسی تحقیقات انجام شده در رابطه با آلودگی هوا در شهر مشهد، بیانگر آن است که علیرغم افزایش غلظت آلاینده های جوی و بروز پدیده آلودگی هوا در این شهر، پدیده یادشده در کلانشهر مشهد کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته و به همین جهت جنبه های مختلف این معضل محیطی چه در مقیاس محلی و چه در مقیاس منطقه ای کمتر آشکار گردیده است. از نخستین تحقیقات انجام شده می توان به طرح جامع آلودگی هوای شهر مشهد در سال ١٣٧٧ اشاره نمود. در این طرح که در٢ مرحله توسط اداره استاندارد و تحقیقات صنعتی خراسان و با همکاری شرکت کنترل کیفیت هوا برای چهار فصل در سال های ١٣٧٦و١٣٧٧ به انجام رسید، منابع آلاینده ساکن و متحرک در سطح شهر مشهد مورد بررسی اولیه قرار گرفت. همچنین طرح جامع کاهش آلودگی هوای مشهد جهت شناسایی وضعیت موجود و برنامه ریزی برای بهبود شرایط محیطی در سال ١٣٨٤ به اجرا درآمد. شواهد حاکی از آن است که طرح های فوق نتوانسته اند نقشی در بهبود وضعیت آلودگی هوای شهر ایفا نمایند (شهرآرا، ١٣٩١)، بخصوص با در نظر گرفتن این نکته که هنوز طرح جامع کاهش آلودگی هوای مشهد به جهت کمبود منابع مالی به اتمام نرسیده است. اگرچه در راستای شناخت ویژگی های آلودگی هوا در سطح شهر مشهد مجموعه پژوهش هایی صورت گرفته است، اما نتایج بدست آمده رضایت بخش نبوده و در حقیقت هنوز درک درستی از میزان غلظت، نحوه توزیع فضایی و تغییرات و نوسانات زمانی–مکانی آلاینده ها درکلانشهر مشهد وجود ندارد. به نظر می رسد نبود داده های مناسب، مطالعه بسیاری از جنبه های آلودگی هوای شهری را درکلانشهر مشهد با مشکل مواجه ساخته است. برای مثال در مطالعه ای که با عنوان «طرح توسعه و عمران جامع کلانشهر مشهد مقدس (مطالعات پایه محیط طبیعی)» توسط وزارت مسکن و شهرسازی به منظور فراهم نمودن اطلاعات لازم از بستر طبیعی شهر مشهد به انجام رسیده

است (مهندسان مشاور فرنهاد،۱۳۸۷)، در بخش آلودگی هوا، تنها به ارائه نقشه کانون ها، مراکز مولد آلودگی هوا و پتانسیل موجود در تولید آلاینده ها اکتفاء شده (شکل ۱–a) و در حقیقت هیچ گونه تصویری از میزان غلظت و یا پراکنش زمانی و مکانی آلاینده ها ارائه نشده است. در عین حال، در تنها نقشه ی موجود از میزان غلظت و پراکنش فضایی آلودگی هوا در شهر مشهد، امکان نمایش وضعیت منواکسید کربن تنها برای سال ۱۳۸۹ فراهم گردیده است (شکل ۱–b).

علیرغم نقض در مطالعات شناختی و پایه، آلودگی هوا در کلانشهر مشهد موضوع اصلیِ برخی از پژوهش ها بوده است. از آن جمله می توان به بررسی آلودگی هوای ناشی از استقرار ۳ نیروگاه در حاشیه شهر مشهد (موسوی و همکاران، ۱۳۸۲)، میزان انتشار ذرات معلق درکارخانجات تولید آسفالت در حاشیه شهر مشهد (منصوری و علی نژاد، ۱۳۸۸)، ارزش گذاری اقتصادی آلودگی هوا در شهر مشهد (قربانی و فیروز زارع، ۱۳۸۸) و بررسی و اندازه گیری منابع آلودگی هوای شهر مشهد (فهیمی فرد و افشار، ۱۳۸۹) اشاره نمود. آنچه مسلم است تعداد پژوهش هایی که بطور مستقیم و یا غیر مستقیم نقش شرایط اقلیمی و هواشناختی در آلودگی هوای شهر مشهد را مورد توجه قرار داده اند بسیار معدود و انگشت شمارند. از آن جمله، علیجانی و نجفی نیک (۱۳۸۸) وارونگی های دمایی شهر مشهد را از منظر همدید مورد توجه قرار داده اند. در پژوهش یادشده با استفاده از داده های جو بالای ایستگاه مشهد، تعداد ۳۲٤ روز دارای وارونگی دمایی برای یکدوره ۱۷ساله (۱۹۹۳–۱۹۷۷) استخراج گردید. داده های شبکه بندی شده فشار تراز دریا برای روزهای فوق با استفاده از روش های تحلیل عاملی و تحلیل خوشه ای مورد پردازش قرار گرفت و در نهایت وارونگی های دمایی شهر مشهد در ارتباط با ۷ تیپ گردشی طبقه بندی شد. یافته ها حکایت از آن دارد که شدت و فراوانی وقوع وارونگی های دمایی در ایام سرد سال به بیشینه خود رسیده و در عین حال در این دوره از سال وارونگی های دمایی شهر مشهد از تداوم و پایداری بیشتری در قیاس با سایر فصول سال برخوردارند. همچنین جهانشیری (۱۳۸۹) با استفاده از داده های روزانه منواکسیدکربن و ذرات معلق (PM_{10}) برای یکدوره یک ساله (سال ۱۳۸۸)، سامانه های فشاری مؤثر بر افزایش آلودگی هوا در شهر مشهد را مورد بررسی قرار داد. برای انجام بررسی، از داده های ۸ ایستگاه سنجش آلودگی هوا که درسطح شهر مشهد پراکنده گردیده اند، استفاده شد. نتایج بررسی منجر به شناسایی پنج الگوی همدید برای روزهای آلوده درکلانشهر مشهدگردید که در میان الگوهای تعیین شده، سامانه های کم فشار نیز از نقش قابل توجهی برخوردار بوده اند. در یکی از جدیدترین پژوهش ها، حسین زاده و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از داده های روزانه منواکسید کربن و ذرات معلق (PM_{10}) تعداد ۱۸۹ روز آلوده را در کلان شهر مشهد برای یکدوره ٤ ساله (۱۳۸۹–۱۳۸٦) به روش همدید مورد بررسی قرار دادند و در مجموع تعداد ۲۰ الگوی همدید برای روزهای آلوده استخراج نمودند.

مروری بر تحقیقات انجام شده مبین آن است که بررسی جامعی در رابطه با نقش فرآیندهای جوی و الگوهای منطقه ای گردش جو بر غلظت آلاینده ها درکلانشهر مشهد به انجام نرسیده است. از آنجایی که کیفیت هوای شهر

بطور توامان توسط منابع انتشار آلاینده ها و شرایط جوی حاکم تعیین می گردد و در عین حال، دوره های آلودگی حاد در محیط شهری، اساساً نتیجه تسلط شرایط جوی خاص و یا الگوهای گردش جوی معینی می باشد که از انتقال و یا پخش آلاینده ها در مقیاس های محلی و منطقه ای ممانعت نموده و یا آن را کنترل می نمایند (زیوماس و همکاران، ۱۹۹۵)، بنابراین تحقیق حاضر سعی دارد نقش گردش منطقه ای جو را در بروز روزهای بسیار آلوده درکلانشهر مشهد مورد بررسی قرار دهد. در این راستا، شناسایی سازوکار همدید و ترمودینامیکی حاکم بر وقوع روزهای بسیار آلوده در این شهر، هدف اصلی پژوهش حاضر محسوب می گردد.



شکل ۱ (a) نقشه کانون ها، مراکز مولد آلودگی هوا و پتانسیل تولید آلودگی در محدوده کلانشهر مشهد براساس منابع آلاینده ساکن و متحرک (طرح جامع کاهش آلودگی هوای شهر مشهد، ۱۳۸٤؛ به نقل از مهندسان مشاور فرنهاد، ۱۳۸۷؛ ۹۸). (b) غلظت منوکسیدکربن و پراکنش فضایی آن در مشهد برای سال ۱۳۸۹ (گلریز ضیایی و همکاران،۱۳۹۰). ایستگاه وحدت با علامت ✦ نشان داده شده است.

۲. منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد مرکز شهرستانی به همین نام در استان خراسان رضوی است که به لحاظ موقعیت در ′۳ °۵۹ تا ′۳۵ °٦۰ طول شرقی و ′٤۲ °۳۵ تا ′۵۹ °۳٦ عرض شمالی قرار گرفته و از شمال به شهرستان کلات، از شمال غرب به درگز، از غرب به چناران و نیشابور و از شرق به سرخس و تربت جام محدود می گردد. این شهر در انتهای جنوبی دشت توس واقع شده و جزئی از حوضه آبریز کشف رود محسوب می گردد. رشته کوه هزار مسجد در شمال شرقی و رشته کوه بینالود در غرب و جنوب غربی آن قرار دارند. مهمترین رشته کوهی که با جهت شمال غربی–جنوب شرقی این ناحیه را در برمی گیرد اژدرکوه با ارتفاع تقریبی ۳۰۰۰ متر است. وسعت کل حوضه آبریز کشف رود ۱٦۵۰۰ کیلومتر مربع است که حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع آن دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می دهند. بلندترین نقطه در قله بینالود واقع است و حدود ۳۳۰۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. پایین ترین نقطه در محل خروجی حوضه (پل خاتون) قرار گرفته و ۵۸۰ متر از سطح دریا بلندتر است. از نظر آب و هوایی حوضه آبریز

رودخانه کشف رود دارای اقلیمی خشک تا نیمه خشک است. مقادیر متوسط سالانه نزولات جوی آن بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی متر و متوسط درجه حرارت هوا در ایستگاه هواشناسی مشهد، ۱۳/۵ درجه سانتیگراد گزارش شده است. متوسط حداقل و حداکثر دما در سردترین ماه سال، دی ،٤,٧ درجه سانتیگراد و متوسط حداکثر آن درگرمترین ماه سال، تیر ،۳۳,۹ درجه سانتیگراد می باشد. متوسط حداقل دمای هوا در ۳ ماه سال، زیر صفر است. تعداد روزهای یخبندان در طول سال به طور متوسط ۱۰۰ روز می باشد. موقعیت و شکل قرارگیری این کلان شهر به گونه ای است که امکان تخلیه طبیعی هوا در این شهر را محدود نموده است.

۳. مواد و روش ها

به منظور شناسایی نقش گردش منطقه ای جو بر وقوع روزهای همراه با هوای بسیار آلوده در مشهد از یک روش تحلیل همدید ترکیبی استفاده شد. از منظر روش شناسی، مطالعه حاضر از رویکرد همدید «*محیط به گردش*» سود جسته (یارنال، ۱۹۹۳؛ علیجانی، ۱۳۸۱) و با توجه به محدود بودن روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد، از روش تحلیل همدید «دستی (*Subjective*)» جهت پردازش داده ها و تحلیل وضعیت جوی حاکم استفاده نموده است.

۳. ۱. داده ها

در پژوهش حاضر از چهار دسته داده استفاده شد. این داده ها شامل داده های آلودگی ثبت شده در ایستگاه های سنجش آلودگی هوا، داده های رقومی جوی، داده های ایستگاه جو بالا و خروجی های مدل*HYSPLIT* جهت ردیابی ذرات معلق در جو می گردد. داده های آلودگی هوا مربوط به ایستگاه وحدت واقع در مرکز شهر مشهد بوده (شکل ۱–b)، که از سازمان حفاظت محیط زیست خراسان رضوی اخذ گردیده است. آلاینده ها شامل منوکسیدکربن، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد، ازن و ذرات معلق (PM_{10}) می باشند که در مقیاس روزانه و برای یکدوره آماری ۷ ساله (۱۳۹۰–۱۳۸٤) تهیه و مورد پردازش قرار گرفته است. در بررسی وضعیت کیفیت هوا در سطح شهر مشهد اشاره به این نکته ضروری است که شهر مشهد تا سال ۱۳۸۸ تنها از یک ایستگاه سنجش آلودگی هوا (ایستگاه وحدت) برخوردار بوده و متأسفانه از تعداد ۱۰ ایستگاه موجود برای سنجش آلودگی هوا، تنها ایستگاه وحدت از طول دوره آماری مناسب برای مطالعه برخوردار بوده است. بر این اساس، مطالعه حاضر تنها با استفاده از داده های آلودگی ثبت شده در ایستگاه وحدت به انجام رسیده و از بهره گیری داده های سایر ایستگاه ها به جهت کوتاه بودن طول دوره آماری صرفنظر گردیده است.

برای مطالعه شرایط جو از داده های دوباره تحلیل شده مرکز ملی پیش بینی محیطی/ مرکز ملی پژوهش جوی (*NCEP/NCAR*) با تفکیک افقی ۲/۵× ۲/۵ درجه (کالنی و همکاران، ۱۹۹٦؛ کیستلر و همکاران، ۲۰۰۱) استفاده شد. داده های جوی شامل فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، انرژی پتانسیل همرفتی در دسترس، سرعت قائم و مؤلفه های مداری(u) و نصف النهاری(v) باد برای ترازهای مختلف جو و در حدفاصل زمانی٦ ساعته می باشد. علاوه بر

آن از داده های جو بالای ایستگاه مشهد (فرودگاه مشهد) برای دوره مشابه استفاده شد. داده های جو بالا از سایت دانشگاه وایومینگ (*http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html*) برای روزهای مورد مطالعه اخذ گردیده و شامل دمای هوا، دمای نقطه شبنم، جهت و شدت باد و شرایط پایداری و ناپایداری جو (بر اساس منحنی های اسکیوتی– *logP*) می گردد. این داده ها برای ایستگاه مشهد تنها برای ساعت صفرگرینویچ موجود می باشند. از خروجی های مدل *HYSPLIT* نیز به عنوان داده های تکمیلی برای ردیابی ذرات معلق در روزهای دارای آلودگی حاد استفاده شد. در این مطالعه نسخه ٤,٩ مدل *HYSPLIT* مورد استفاده قرار گرفت.

۲. ۳. روش‌ها

از منظر روش شناسی، پژوهش حاضر از یک روش همدید ترکیبی برای شناسایی نقش الگوهای گردش جو بر وقوع روزهای بسیار آلوده در مشهد استفاده نموده است. پژوهش در چند مرحله به شرح زیر به انجام رسیده است:

– در نخستین مرحله از تحقیق با بهره گیری از داده های آلودگی ثبت شده در ایستگاه وحدت (شکل۱–b)، وضعیت آلودگی هوا در شهر مشهد برای یکدوره ۷ ساله مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور شاخص استاندارد آلودگی هوا (*PSI*) برای هریک از آلاینده ها (منوکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد، ازن و ذرات معلق (PM_{10}) در مقیاس روزانه محاسبه شد. شاخص استاندارد آلودگی توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا جهت سهولت گزارش کیفیت هوا از رسانه های عمومی تعریف گردیده است. در این شاخص غلظت آلاینده های هوا را به اعداد ساده ای بین صفر تا ۵۰۰ تبدیل و در نهایت کیفیت هوا را با واژه های پاک، مجاز، ناسالم و.... بیان می کنند (اصیلیان، ١٣٨٦). جدول۱ طبقات کیفیت هوا را بر اساس شاخص استاندارد آلودگی نشان می دهد.

جدول۱ طبقات شاخص استاندارد آلودگی هوا (منبع: آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، ۱۹۷۸؛ واثقی و زیبایی، ۱۳۸۷)

کیفیت هوا	PSI
خوب (پاک)	۰ – ۵۰
متوسط (مجاز)	۵۱ – ۱۰۰
آلوده (ناسالم)	۱۰۱ – ۲۰۰
بسیارآلوده (بسیار ناسالم)	۲۰۱ – ۳۰۰
سمی (خطرناک)	> ۳۰۰

نحوه محاسبه شاخص استاندارد آلودگی هوا (*PSI*) به شرح زیر می باشد (آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، ۱۹۹۸؛ ١٦):

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{HI} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \qquad (1)$$

جائیکه، I_p= مقادیر محاسبه شده شاخص استاندارد آلودگی هوا برای آلاینده مورد نظر، C_p= غلظت آلاینده مورد نظر در زمان معین، BP_{Hi}= مقادیرآستانه بالا برای طبقه ای که غلظت آلاینده مورد بررسی در آن طبقه قرار می گیرد، BP_{Lo}= مقادیر آستانه پایین برای طبقه ای که غلظت آلاینده مورد بررسی در آن طبقه قرار می گیرد، I_{Hi}= مقادیرPSI مرتبط باBP_{Hi}، I_{Lo}= مقادیرPSI مرتبط با BP_{Lo}.

در پژوهش حاضر با بهره گیری از معادله (۱) و با در نظر گرفتن آستانه های موجود درجدول۲، برای هر یک از آلاینده های شهری، مقادیر***PSI*** روزانه محاسبه گردید.

جدول۲ مقادیر آستانه آلاینده ها به تفکیک برای هر طبقه از شاخص **PSI**. (منبع: آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، ۱۹۹۸)

PSI	O_3 ۱ ساعته ppm	O_3 ۸ ساعته ppm	CO ۲۴ ساعته ppm	PM_{10} ۲۴ ساعته $\mu g/m^3$	SO_2 ۲۴ ساعته ppm	NO_2 ۲۴ ساعته ppm
۰ – ۵۰	–	۰/۰۰ –۰/۰۶۹	۰ –۴/۴	۰ –۵۴	۰/۰۰ –۰/۰۳۴	–
۵۱ – ۱۰۰	–	۰/۰۷ –۰/۰۸۴	۴/۵ –۹/۴	۵۵–۱۵۴	۰/۰۳۵ –۰/۱۴۴	–
۱۰۱ – ۱۹۹	۰/۱۲۵ –۰/۲۰۴	۰/۰۸۵ –۰/۱۲۴	۹/۵ –۱۵/۴	۱۵۵–۳۵۴	۰/۱۴۵ –۰/۳۰۴	–
۲۰۰ – ۲۹۹	۰/۲۰۵ –۰/۴۰۴	۰/۱۲۵ –۰/۳۷۴	۱۵/۵–۳۰/۴	۳۵۵–۴۲۴	۰/۳۰۵ –۰/۶۰۴	۰/۶۵ –۱/۲۴
>۳۰۰	۰/۵۰۵ –۰/۶۰۴	–	۳۰/۵–۵۰/۴	۴۲۵–۶۰۴	۰/۶۰۵ –۱/۰۰۴	۱/۲۵ –۲/۰۴

با محاسبه شاخص استاندارد آلودگی هوا، امکان بررسی وضعیت کیفیت هوا در شهر مشهد میسرگردید. بدین ترتیب با استفاده از شاخص یادشده، تغییرات زمانی کیفیت هوا در مقیاس های زمانی روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه برای شهر مشهد مورد بررسی قرار گرفت. در عین حال، با بهره گیری از شاخص *PSI* روزهای بسیار آلوده (۲۰۰< *PSI*) در شهر مشهد شناسایی شد. جدول۳ تمامی روزهایی که شهر مشهد، در وضعیت آلودگی حاد (بسیار آلوده) بوده و در پژوهش حاضر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است را نشان می دهد. شایان ذکر است که در مطالعه حاضر از تحلیل همدید روزهای با مقادیر ازن حدّی صرفنظر گردید. کاهش تعداد روزهای مورد مطالعه جهت افزایش دقت تحلیل همدید به روش ترکیبی، تفاوت در ساز و کار تولید آلاینده ازن در قیاس با سایر آلاینده ها، همچنین تفاوت در توزیع فصلی روزهای بسیار آلوده مربوط به این آلاینده و به تبع آن تفاوت در شرایط گردشی ایجاد کننده روزهای همراه با مقادیر ازن بسیار بالا، از جمله دلایلی است که سبب کنارگذاشتن روزهای با مقادیر ازن حدّی در مطالعه حاضر گردیده است.

– در مرحله بعد با بهره گیری از داده های رقومی دوباره تحلیل شده از مراکز ملی پیش بینی محیطی/ مرکز ملی پژوهش جوی (*NCEP/NCAR*) با تفکیک افقی ۲/۵× ۲/۵ درجه (کالنی و همکاران، ۱۹۹۶)، الگوی جریان و شرایط جوی حاکم از دو روز قبل از وقوع هر روز آلوده به صورت ٦ ساعته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با

بهره گیری از داده های رقومی یادشده، نقشه های فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل ترازهای۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، باد برداری، تاوایی نسبی، اُمگا، همچنین نیمرخ های قائم برای امگا و تاوایی نسبی به صورت ترکیبی برای تمام روزهای بسیار آلوده تولید شد. سپس نقشه ها مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار گرفت و گردش منطقه ای جو برای روزهای بسیار آلوده با توجه به شباهت ها و تفاوت های موجود، در چند الگوی گردش جوی اولیه دسته بندی شد. سپس به منظور فراهم نمودن یک دید عمیق تر از فرآیندهای جوی منجر به وقوع روزهای بسیار آلوده، همچنین تفکیک دقیق تر الگوهای گردشی، از یک سری داده های مکمل و پردازش های تکمیلی استفاده شد. بر این اساس، ابتدا ذرات معلق در روزهای آلوده با بهره گیری از یک مدل لاگرانژی و به روش پسگرد ردیابی شد.

جدول ۳ مشخصات روزهای بسیار آلوده (۲۰۰< **PSI**) در ایستگاه وحدت در طول دوره مورد مطالعه (۱۳۹۰-۱۳۸٤).

ردیف	مشخصات	نوع آلاینده	PSI	نوع الگو	ردیف	مشخصات	نوع آلاینده	PSI	نوع الگو
۱	۲۰ اکتبر ۲۰۰۵	PM10	۲۱۹/۸۱	SH	۱۳	۱۸ فوریه ۲۰۰۸	PM10	۲۲۰/۹	SH
۲	۲۱ اکتبر ۲۰۰۵	PM_{10}	۲٦٤/۹	STHP	۱٤	۱۹ فوریه ۲۰۰۸	PM_{10}	۲۱۹/۹	SH
۳	۱۷ نوامبر ۲۰۰۵	CO	۲۰٤/۱۹	SH	۱۵	٤ مارس ۲۰۰۸	PM_{10}	۲۱٦/۹۵	CL
٤	۲۱ نوامبر ۲۰۰۵	CO	۲۰۱/۹۹	SH	۱٦	۱۵ مارس ۲۰۰۸	PM_{10}	۳٤٦	CL
۵	۱٦ دسامبر ۲۰۰۵	PM_{10}	۲۱۱	SH	۱۷	۱۸ آوریل ۲۰۰۸	PM_{10}	۲۱٤/۹	MH
٦	۱۱ می ۲۰۰٦	PM_{10}	۲۱۸/۱۵	STHP	۱۸	۱۹ آوریل ۲۰۰۸	PM_{10}	۲۲۷/۹	MH
۷	۲۷ جولای ۲۰۰۷	CO	۲٦٦/۹	STHP	۱۹	۱۱ می ۲۰۰۸	PM_{10}	۲۰۳/٤۵	STHP
۸	۵ نوامبر ۲۰۰۷	PM_{10}	۲۰٦/۹۹	MH	۲۰	۲۹ می ۲۰۰۸	PM_{10}	۲۰۱/٤۵	STHP
۹	۱۳ نوامبر ۲۰۰۷	PM_{10}	۳٦۵/۱۳	MH	۲۱	۱٤ جون ۲۰۰۸	PM_{10}	۲۱۰	STHP
۱۰	۱٤ نوامبر ۲۰۰۷	PM_{10}	۲۳٤/٦۲	MH	۲۲	۱٦ مارس ۲۰۰۹	PM_{10}	۲۷۹/۱۵	CL
۱۱	۲۰ نوامبر ۲۰۰۷	PM_{10}	۲۲۵/۲۸	MH	۲۳	۲۹ اکتبر ۲۰۰۹	CO	۲۰۰/۱۳	CL
۱۲	۲۱ نوامبر ۲۰۰۷	PM_{10}	۲۲۷/۵۷	CL	-	-	-	-	-

**در جدول۳ هر یک از علائم CL, SH, STHP, MH به ترتیب از راست به چپ معرّف الگوی پرفشار مهاجر، پشته جنب حاره، پرفشار سیبری-پشته جنب حاره و الگوی کم فشار می باشند. شایان ذکر است که در مطالعه حاضر روزهای بسیار آلوده ی مربوط به آلاینده ازن سطحی مورد بررسی قرار نگرفته و به همین جهت از جدول خارج گردیده است)

سپس با استفاده از داده های جو بالای ایستگاه مشهد، شرایط ترمودینامیکی حاکم در طی روزهای آلوده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و در نهایت نقشه های انرژی پتانسیل همرفتی در دسترس به همراه سرعت قائم برای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال تولید شده و به منظور تفکیک الگوهای گردش جو مورد بررسی قرار گرفت. بررسی ترکیبی مؤلفه های فوق، تفکیک دقیق تر الگوهای گردشی اولیه را امکان پذیر ساخت، بطوریکه جدایش روزهای دارای الگوی گردش چرخندی از الگوی واچرخندی و سامانه های جنب حاره ای از برون حاره را به نحو مطلوبتری فراهم نمود.

– با بهره گیری از داده های جو بالای ایستگاه مشهد، شرایط جوی در مقیاس محلی برای تمامی روزهای بسیار آلوده بررسی شد. تجزیه و تحلیل داده های فوق از این منظر دارای اهمیت است که درکنار بررسی های همدید، خصوصیات مقیاس محلی پدیده آلودگی هوا ارزیابی می گردد. با استفاده از داده های جو بالا، شرایط پایداری و ناپایداری جو، وجود و یا عدم وجود وارونگی دما، نوع و سطح وارونگی و جهت و شدت باد برای هریک از روزهای آلوده مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور با استفاده از داده های متنی دانشگاه وایومینگ، منحنی اسکیوتی–*logP* به تفکیک برای هر یک از روزهای آلوده تهیه شد. با بررسی منحنی های یادشده، روزهای بسیار آلوده شهر مشهد بر اساس تشابهات و تفاوت های محلی نیز دسته بندی شدند. جهت سهولت مطالعه، برای هر یک از الگوهای شناسایی شده، منحنی ها و نیمرخ های متوسط ترسیم شد. علاوه بر نمودار ترمودینامیک، جهت تفکیک الگوهای گردش جو، از انرژی پتانسیل همرفتی در دسترس (CAPE) به عنوان یک شاخص مکمل استفاده شد. این شاخص به جهت آن که انرژی شناوری بسته هوا را در امتداد قائم انتگرال گیری می کند، ابزاری کارآمد جهت تعیین شرایط بالقوه برای بروز فعالیت های همرفتی محسوب می گردد (مانکرییف و میلر، ۱۹۷٦) و امکان مطالعه شدت حرکت بالاسو را فراهم می نماید (داسول و راسموسن، ۱۹۹٤). برخلاف سایر شاخص های محاسبه پایداری که عمدتاً برای یک تراز خاص (*Single level*) طراحی گردیده اند، شاخصCAPE مقادیر انرژی شناور تجمعی در لایه همرفتی آزاد را درحد فاصل تراز همرفت آزاد (ترازی که دمای بسته هوا از دمای محیط پیرامون تجاوز می نماید و بسته هوا در قیاس با محیط پیرامون ناپایدار است) تا تراز تعادل (ترازی که دمای محیط پیرامون از دمای بسته هوا تجاوز نموده و بسته هوا در قیاس با محیط پیرامون پایدار است) محاسبه می نماید. معادله CAPE به شکل زیر نوشته می شود (داسول و راسموسن، ۱۹۹٤):

$$\mathrm{CAPE} = g \int_{z_{\mathrm{LFC}}}^{z_{\mathrm{EL}}} \left(\frac{T_{v_p} - T_{v_e}}{T_{v_e}} \right) dz, \tag{۲}$$

جائیکه، T_{vp} دمای بالقوه بسته هوا، T_{ve} دمای بالقوه محیط، Z_{EL} ارتفاع تراز تعادل، Z_{LFC} تراز همرفت آزاد و g نیروی گرانش زمین می باشد.

– در این تحقیق از خروجی های یک مدل ردیابی ذرات معلق برای مطالعه نحوه انتقال ذرات معلق در روزهای آلوده استفاده شد. بررسی های سابق حکایت از آن دارد که افزایش غلظت آلاینده ها و پیدایش روزهای با آلودگی بالا، ارتباط تنگاتنگی با انتقال و پخش ذرات و آلاینده ها در مقیاس محلی و یا منطقه ای دارد. بر این اساس، جهت تعیین نحوه انتقال و پخش ذرات در طی روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد از یک مدل لاگرانژی[1] با امکان ردیابی پسگرد ذرات در ترازهای مختلف جو موسوم به *HYSPLIT*[2] استفاده شد (دراکسلر و رالف، ۲۰۱۱). برای مسیریابی پسگرد، ذرات معلق در ایستگاه مشهد در زمان اوج آلودگی در نظر گرفته شد. در این مطالعه نسخه ٤,۹ مدل *HYSPLIT*

1 Lagrangian
2 HYbrid-Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)

مورد استفاده قرار گرفت و ذرات در دو سطح ۱۰۰ و ۱۰۰۰ متری از سطح زمین و در حدفاصل زمانی ٦ ساعت تا ۲٤ ساعت قبل ردیابی شدند. برای اجرای مدل از مجموع داده های *FNL* استفاده شد. داده های *FNL* در واقع داده های *NCEP* هستند که توسط لابراتوار منابع هوا وابسته به *NOAA* مورد پردازش مجدد قرار گرفته است. این داده ها با قدرت تفکیک افقی ۱×۱ درجه، برای ۲٦ تراز فشاری (۱۰۰–۱۰۰۰ هکتوپاسکال) و با گام زمانی ٦ ساعت از جولای ۱۹۹۹ در دسترس می باشند. داده های تحلیل شده عملیاتی مقیاس جهانی نهایی *NCEP* یا بطور مختصر *FNL (Final)* از سامانه یکپارچه سازی داده های جهانی (*GDAS*[1]) برای تهیه داده های اولیه ورودی به سیستم استفاده می نماید. سامانه GDAS نیز وظیفه جمع آوری داده های مشاهداتی از سراسر جهان را با استفاده از سامانه ارتباط از راه دور (*GTS*[2]) و سایر منابع به صورت بی وقفه و پیوسته برعهده دارد. در نهایت داده های *FNL* با مدلی مشابه مدلی که مرکز ملی پیش بینی محیطی برای تولید داده های سامانه پیش بینی جهانی (*GFS*[3]) استفاده می کند تولید می گردد (استاندر، ۱۹۹۷). بدین ترتیب برای تمامی روزهای آلوده، نقشه های مسیر پسگرد انتقال ذرات تهیه شد. سپس روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد از منظر نحوه انتقال ذرات نیز دسته بندی شد و نقشه های مسیر انتقال ذرات به تفکیک برای هر یک از الگوهای گردش جو ترسیم گردید. در مرحله نهایی، با ترکیب نتایج حاصل از تحلیل های همدید، بررسی های محلی داده های جو بالا و ردیابی ذرات در مدل*HYSPLIT*، الگوهای اصلی گردش جو در ارتباط با روزهای بسیار آلوده در مشهد شناسایی شد. در عین حال، به منظور ارائه ویژگی ها و جنبه های غالب مربوط به هر الگوی گردشی با متوسط گیری از شرایط موجود، نقشه ها و نمودارهای متوسط برای هر الگو تهیه شد.

٤. بحث و نتایج

٤. ۱. تحلیل همدید روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد

پس از بررسی وضعیت فشار، تاوایی نسبی، مقادیر سرعت قائم، شدت و جهت جریان و مناطق همگرایی و واگرایی هوا در ترازهای مختلف جو، الگوهای همدید اولیه برای تمامی روزهای بسیار آلوده (جدول۳) شناسایی شد. اما به جهت فراهم نمودن درکی عمیق تر از ساختار گردش جو، علاوه بر مؤلفه های یاد شده، داده های جو بالا، نقشه های انرژی پتانسیل همرفتی در دسترس و خروجی های مدل*HYSPLIT* نیز مورد استفاده قرار گرفت. تجزیه و تحلیل ترکیبی تمامی مؤلفه های فوق،در نهایت سبب شناسایی الگوهای گردشی اصلی برای روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد گردید. الگوهای گردشی اصلی روزهای بسیار آلوده مشهد به شرح زیر می باشند:

1Global Data Assimilation System
2 Global Telecommunications System
3 Global Forecast System

۱. ۱. ٤. الگوی پرفشار سیبری - پشته جنب حاره ای

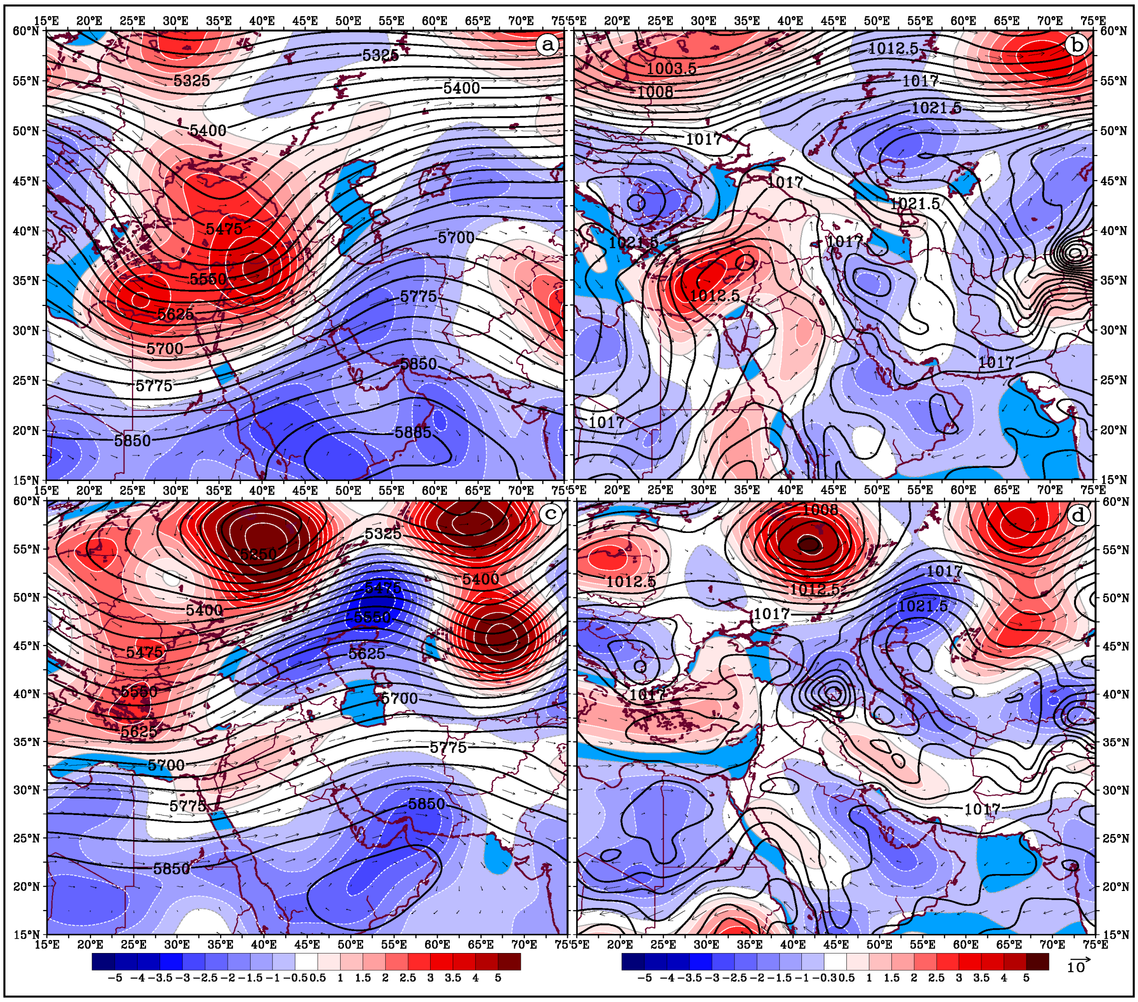
در این الگو که تعداد ٦ روز بسیار آلوده ی شهر مشهد در ماه های دوره سرد را شامل می گردد، گسترش و تسلط همزمان زبانه های پرفشار سیبری در ترازهای زیرین و پشته ی جنب حاره ای در ترازهای میانی جو، سبب افزایش فشار هوا و شکل گیری گردش واچرخندی بر روی منطقه شمال شرق ایران گردیده است (شکل۲–a و ۲–b). بررسی روند تکوین سامانه ها در این الگو، بیانگر آن است که در ترازهای میانی جو، در پی استقرار پشته ای قوی بر روی اروپا، ناوه ای عمیق در حدفاصل شرق مدیترانه تا نیمه غربی خاورمیانه به عرض های جنب حاره ای نفوذ نموده است. عمیق شدن ناوه و گسترش جنوب سوی آن، در ادامه، ضمن تغییر الگوی گردش منطقه ای جو بر روی خاورمیانه، تقویت گردش واچرخندی و گسترش شمال و شرق سوی پشته/پرارتفاع جنب حاره ای را بر جانب شرقی خود در پی داشته است (شکل۲–a). تقویت و گسترش پشته/پرارتفاع جنب حاره ای در ترازهای میانی، به نوبه خود، تسلط گردش واچرخندی همراه با مقادیر تاوایی منفی بالا را بر روی تمامی مناطق خاورمیانه، واقع در شرق طول ٤٥°، موجب گردیده است. به نظر می رسد گسترش شمال و شرق سوی این مرکز پرارتفاع در ترازهای میانی، علاوه بر تقویت گردش واچرخندی سطحی در مناطق داخلی ایران، در عین حال، گسترش غرب سوی زبانه های پرفشار سیبری به مناطق واقع در شمال شرق ایران و شرق دریای خزر را بدنبال داشته است (شکل۲–b). گسترش غرب سوی زبانه های پرفشار سیبری و تقویت گردش واچرخندی بر جانب شرقی دریای خزر، حکایت از تقویت دینامیکی مرکز پرفشار سیبری توسط پشته جنب حاره ای دارد.

بررسی وضعیت صعود و نزول هوا بر روی منطقه به نحو بارزتری نقش گردش منطقه ای جو در بروز روزهای بسیار آلوده در مشهد را نمایان می سازد. شکل های ۳–a و ۳–b وضعیت متوسط صعود و نزول هوا را به ترتیب در امتداد مداری و نصف النهاری بر روی مشهد در زمان تسلط الگوی پرفشار سیبری - پشته جنب حاره، نشان می دهند. با توجه به شکل۳–a، گسترش غرب سوی زبانه های پرفشار سیبری یک نزول بسیار شدید (مقادیر بالای امگای مثبت) را در ترازهای زیرین بر روی شمال شرق ایران ایجاد می نماید. در این الگو، بیشینه نزول هوا در زیر تراز ۸۰۰ هکتوپاسکال و در حدفاصل طول ٦٧° تا ۸۰° شرقی بوقوع می پیوندد. با این وجود، شهر مشهد به جهت گسترش غرب سوی زبانه های پرفشار سیبری، نزول و پایداری هوا را در تمامی ترازهای جو تا تراز۲۰۰ هکتوپاسکال تجربه می نماید. بررسی نیمرخ نصف النهاری (عرضی) نیز بیانگر آن است که استقرار پشته جنب حاره بر روی منطقه یک نزول گسترده و پرضخامت را بر روی منطقه شمال شرق و بخش های داخلی ایران ایجاد می نماید (شکل۳–b). به نظر می رسد شکل گیری بیشینه نزول هوا بر روی پرفشار سیبری در محدوده ۷۰° طول شرقی (بیشینه ۰/۳۳ $Pa\ s^{-1}$ در شکل۳–a)، ناشی از استقرار پشته ترازهای میانی بر جانب غربی آن (شکل۲–a) باشد.

جهت فراهم نمودن درکی جامع تر از الگوی گردش جو در زمان وقوع روزهای بسیار آلوده، با بهره گیری از خروجی های مدل *HYSPLIT*، نحوه انتقال و پخش ذرات معلق در ارتفاع ۱۰۰ و ۱۰۰۰ متری از سطح زمین برای شهر مشهد مورد بررسی قرار گرفت. ردیابی پسگرد ذرات معلق در مقیاس منطقه ای، بر این اساس به انجام رسیدکه افزایش غلظت آلاینده ها و پیدایش روزهای با آلودگی بالا، ارتباط تنگاتنگی با انتقال و پخش ذرات و آلاینده ها در مقیاس محلی و یا منطقه ای دارد. بدین ترتیب ردیابی ذرات معلق، با فراهم نمودن اطلاعات بیشتری از نحوه انتقال و پخش آلودگی در منطقه مطالعه، تفکیک دقیق تر روزهای آلوده را در رابطه با جریان هوا در مقیاس منطقه ای امکان پذیر می سازد. شکل ٤–a مسیر ذرات معلق را به تفکیک در ارتفاع ۱۰۰ و ۱۰۰۰ متری از سطح زمین برای الگوی پرفشار سیبری–پشته جنب حاره ای نشان می دهد. با توجه به شکل، در این الگو در حدفاصل زمانی تا ۱۲ساعت قبل از زمان اوج آلودگی در مشهد، ذرات معلق در پایین ترین ترازهای جو (ارتفاع ۱۰۰ متری–خطوط قرمز رنگ) در یک مقیاس نسبتاً محلی از جانب جنوب–جنوب شرقی به مشهد منتقل گردیده اند. نحوه انتقال ذرات در این تراز به خوبی مبین تسلط زبانه های پرفشار سیبری بر روی منطقه می باشد، بطوری که جریان عمومی ذرات از قطاع جنوب و جنوب شرق به سوی مشهد در خروجی های مدل با شرایط حاکم در الگوی پرفشار سیبری (شکل۲–b) به خوبی منطبق است. شایان ذکر است که در برخی از نمونه ها، ذرات معلق رسیده به مشهد پیش از تسلط پرفشار سیبری بر روی منطقه (در حدفاصل زمانی تا ۲٤ ساعت قبل)، از الگوی گردش حاکم در ترازهای میانی جو تبعیت نموده (شکل۲–a) و به همین در ردیابی پسگرد از محدوده ای واقع در جنوب غرب مشهد منشأ یافته اند. ردیابی پسگرد ذرات در ارتفاع ۱۰۰۰ متری (خطوط آبی رنگ)، تبعیت کامل ذرات معلق موجود در مشهد، از پشته جنب حاره ای را تأیید می نماید. بدین ترتیب که ذرات معلق ورودی به مشهد در این ارتفاع، ضمن تبعیت از نحو استقرار پشته جنب حاره ای (شکل۲–a)، از جنوب غرب به مشهد انتقال یافته اند(شکل ٤–a).

۲. ۱. ٤. الگوی پرفشار مهاجر

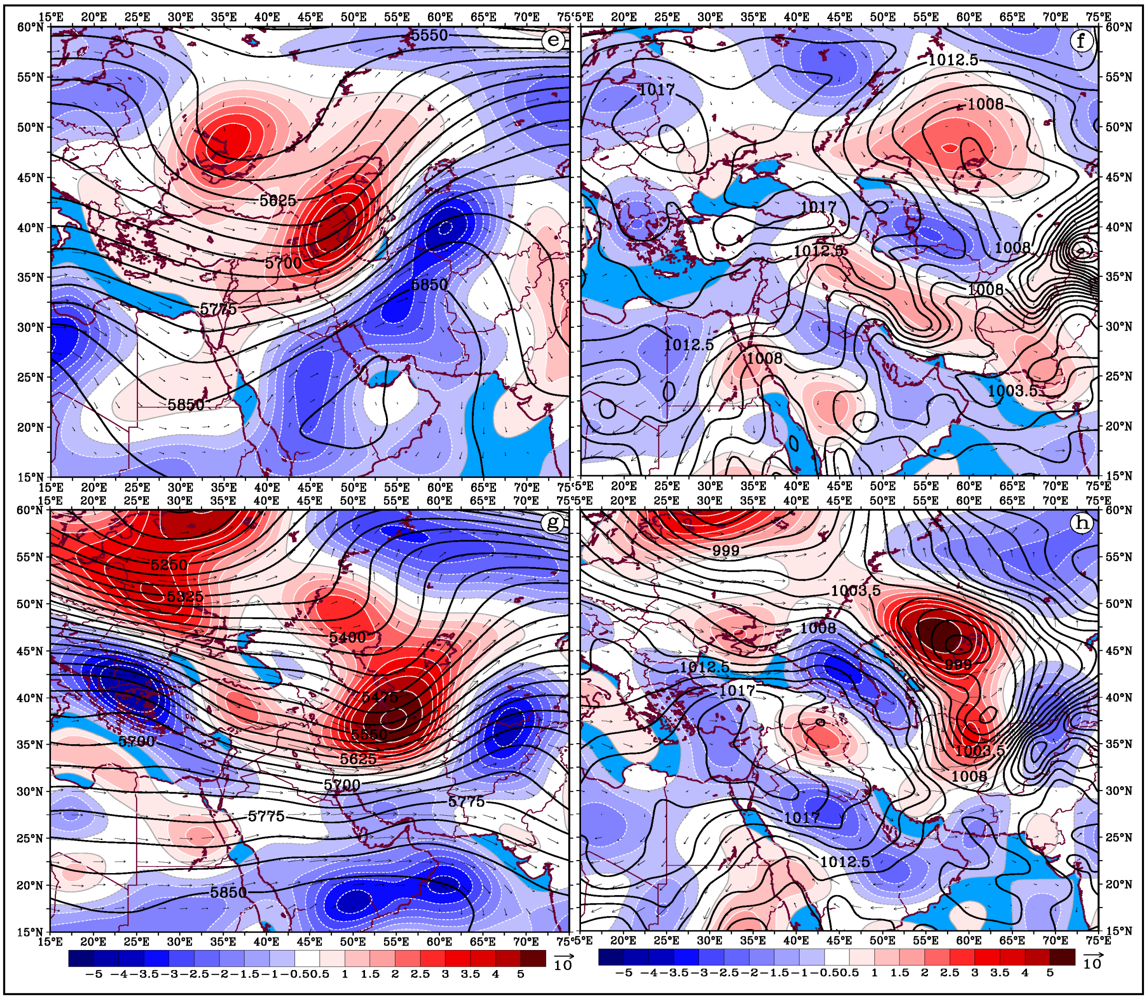
در الگوی پرفشار مهاجر که ٦ روز از مجموع روزهای بسیار آلوده را به خود اختصاص داده است، افزایش بیش از حد غلظت آلاینده ها در شهر مشهد، عمدتاً نتیجه گسترش نصف النهاری یک موج راسبی در منطقه اوراسیا بوده است. در چنین شرایطی و در مراحل عبور موج از روی منطقه، استقرار پشته ای قوی در محدوده رشته کوه های اورال و دریای خزر با یک اریب شرق سو، شکل گیری مرکز گردش واچرخندی را در حدفاصل دریای خزر تا بخش های شمالی خراسان در ترازهای زیرین به همراه داشته، که در نهایت موجب پایداری هوا و افزایش غلظت آلاینده ها در منطقه گردیده است (شکل۲–c و۲–d).



شکل۲ وضعیت همدید در چهار الگوی گردشی منجر به روزهای بسیار آلوده در مشهد. سمت چپ، وضعیت متوسط ارتفاع ژئوپتانسیل (حدفاصل ۲۵ ژئوپتانسیل متر) تاوایی نسبی (رنگها $\times10^{-5} s^{-1}$) و باد برداری در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال. سمت راست، وضعیت متوسط فشار در تراز دریا، تاوایی نسبی و باد برداری در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال. (a) و (b) الگوی پرفشار سیبری–پشته جنب حاره ای. (c) و (d) الگوی پرفشار مهاجر. (e) و (f) الگوی پرفشار جنب حاره. (g) و (h) الگوی کم فشار برون حاره

در الگوی پرفشار مهاجر، نصف النهاری شدن جریان و شکل گیری همزمان دو ناوه بر جانب شرقی و غربی پشته، حرکت شرق سوی پشته برون حاره را در ترازهای میانی جو کند نموده (شکل۲–c) که به تبع آن واچرخند مهاجر ترازهای زیرین نیز شبه ایستا گشته و از تداوم بیشتری بر روی منطقه خزری برخوردارگردیده است (شکل۲–d). در عین حال، در ترازهای میانی جو، نفوذ ناوه ی موج غربی در شرق مدیترانه وگسترش جنوب سوی آن، تقویت پشته جنب حاره ای بر روی منطقه خاورمیانه و گسترش شمال سوی پشته را بر جانب شرقی ناوه بدنبال داشته است. بدین ترتیب از نتایج استقرار الگوی پرفشار مهاجر، شکل گیری یک محدوده ی گسترده و در عین حال پرضخامت از گردش واچرخندی بر روی خاورمیانه است که پایداری و سکون هوا را

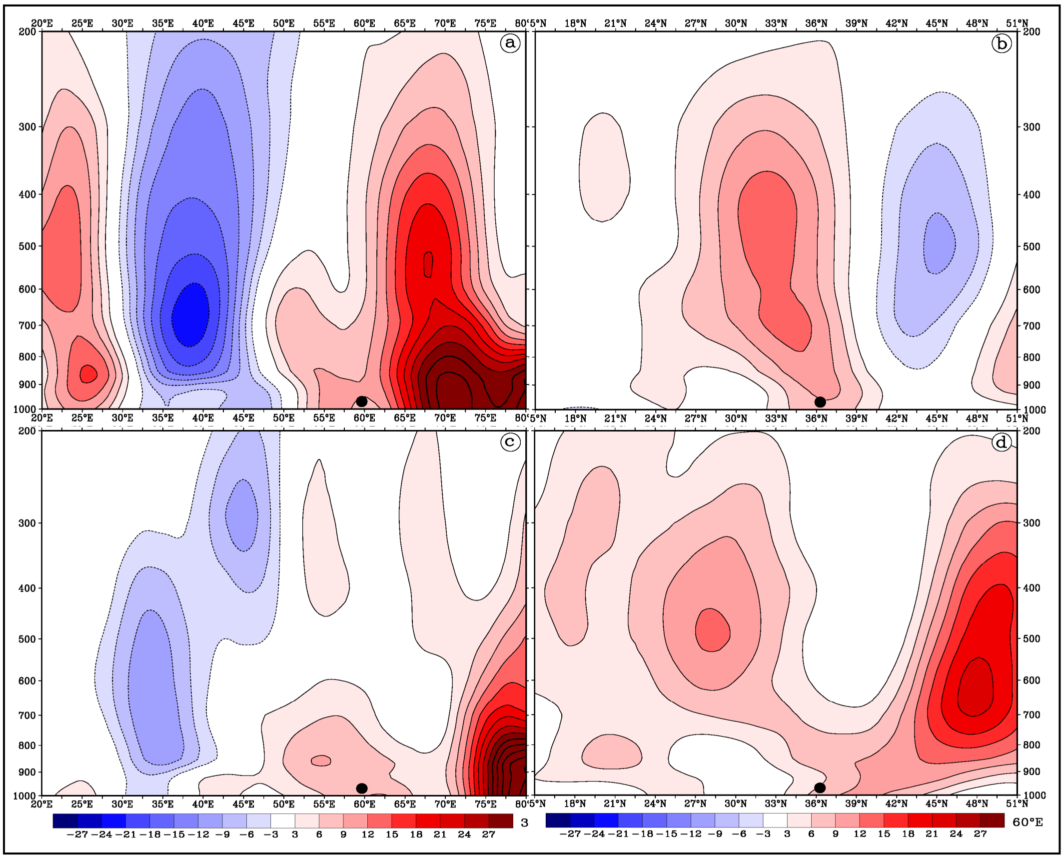
در مقیاس همدید و در ستون جو امکان پذیر ساخته است. چنین گردش واچرخندی گسترده ای به شکل بارزتری در نیمرخ های قائم جو قابل مشاهده است. شکل های۳-a و ۳-b مقادیر متوسط صعود و نزول هوا (امگا) را در راستای قائم در الگوی پرفشار مهاجر نشان می دهند. با توجه به شکل ها، شکل گیری دو منطقه بیشینه نزول هوا، یکی در عرض 27° شمالی و دیگری در زیر پشته برون حاره، بالاتر از عرض 45° شمالی، به خوبی می تواند افزایش بیش از حد آلاینده ها در شهر مشهد را توضیح دهد. با در نظر گرفتن دو نیمرخ قائم مداری و نصف النهاری، میزان نزول هوا بر نیمه شرقی ایران بیش از نیمه غربی کشور بوده (شکل۳-a) و در عین حال، هوا در محدوده شهر مشهد از تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال به سمت زمین نزول می نماید (شکل۳-b).



ادامه شکل۲ (e) و (f) الگوی پرفشار جنب حاره. (g) و (h) الگوی کم فشار برون حاره

ردیابی مسیر ذرات معلق بر روی شهر مشهد در زمان استقرار الگوی پرفشار مهاجر بیانگر آن است که با توجه به موقعیت مرکز پرفشار و محور پشته در منطقه دریای خزر، مسیر پسگرد ذرات بین جهت شمال شرقی تا شمال غربی نوسان دارد. در واقع در الگوی پرفشار مهاجر، ساختار دینامیکی واچرخند تراز زیرین و تبعیت آن از پشته ترازهای میانی،

یک نوع هماهنگی در مسیر ذرات ردیابی شده در ارتفاع ۱۰۰ متری، ۱۰۰۰ متری و ترازهای میانی جو (در اینجا نشان داده نشده است) ایجاد نموده است. بر این اساس، در حالی که پیشروی شرق سوی مرکز پرفشار و پشته در برخی از روزهای مربوط به این الگو، انتقال ذرات را از مسیر شمال تا شمال شرق به شهر مشهد میسر ساخته است، در برخی روزهای دیگر، استقرار مرکز پرفشار و محورپشته بر جانب غربی منطقه، مسیر غرب تا شمال غربی را برای ذرات ردیابی شده رقم زده است (شکل ٤-b).

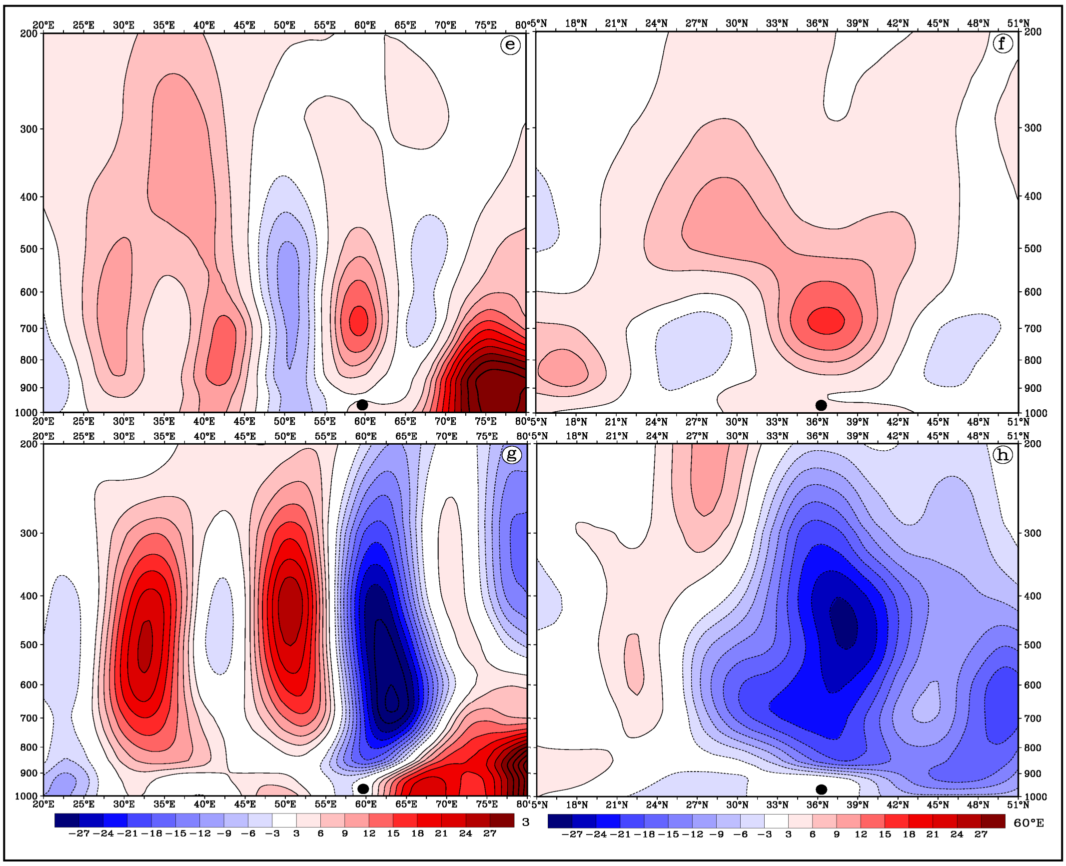


شکل۳ نیمرخ های متوسط سرعت قائم برای چهار الگوی گردشی منجر به روزهای بسیار آلوده در مشهد. سمت چپ، نیمرخ ها در امتداد عرض ´۳۰ °۳٦ شمالی و سمت راست، نیمرخ ها در امتداد طول ´۳۰ °۵۹ شرقی. (a) و (b) الگوی پرفشار سیبری-پشته جنب حاره ای. (c) و (d) پرفشار مهاجر. (e) و (f) پشته جنب حاره. (g) و (h) کم فشار برون حاره. دایره سیاه در هر شکل موقعیت شهر مشهد را نشان می دهد. سرعت قائم برحسب $Pa\,s^{-1}$ ۱۰$^{-2}$ می باشد. در نیمرخ ها، محور افقی نشاندهنده طول (سمت چپ) و عرض (سمت راست) جغرافیایی و محور قائم بیانگر ترازهای فشاری برحسب هکتوپاسکال است

۳. ۱. ٤. الگوی پشته جنب حاره‌ای

الگوی پشته جنب حاره، ٦ روز از روزهای بسیار آلوده در مشهد (PSI>۲۰۰) را به خود اختصاص داده است. از نظر ساختار کلی گردش، الگوی پشته جنب حاره ای شباهت زیادی با الگوی پرفشار مهاجر دارد، با این تفاوت که در الگوی

پرفشار مهاجر عامل اصلی ایجاد پایداری و سکون هوا پشته برون حاره ای است که در مراحل تکوین خود با تقویت و گسترش شمال سوی پشته جنب حاره ای همراه می گردد. در صورتی که در الگوی پشته جنب حاره ای، پایداری و سکون هوا در شمال شرق ایران، صرفاً ناشی از تقویت و گسترش شمال-شمال شرق سوی پشته جنب حاره ای بر روی نیمه شرقی ایران است (شکل۲-e). مضاف بر این، محدوده زمانی وقوع الگوهای یادشده، شاخص دیگری است که تمایز این دو الگو را بارزتر می سازد. در حالی که روزهای بسیار آلوده ی ناشی از استقرار الگوی پرفشار مهاجر، با توجه به ماهیت این الگو، در ماه های دوره سرد سال (از نوامبر تا آوریل) مشاهده می گردد.



ادامه شکل۳ (e) و (f) الگوی پشته جنب حاره. (g) و (h) الگوی کم فشار برون حاره

در مقابل، آلودگی های حدّی ناشی از استقرار الگوی پشته جنب حاره ای در دوره گرم سال (نیمه ماه می تا نیمه اکتبر) قابل مشاهده است (جدول۳). گستردگی و شدت گردش واچرخندی در الگوی پشته جنب حاره، تعلق آن را به دوره گرم سال مورد تأیید قرار می دهد (شکل۲-e). لازم به توضیح است که در هیچ یک از الگوهای گردشی استخراج شده، مقادیر گردش واچرخندی (تاوایی منفی) در ترازهای میانی وردسپهر بر روی منطقه شمال شرق ایران به اندازه مقادیر مشاهده شده در الگوی پشته جنب حاره ای نمی باشد. در دوره گرم سال ناوه ی موج غربی در یک گسترش جنوب سو، به دفعات بر جانب شرقی مدیترانه نفوذ می نماید. نفوذ یادشده، آن چنانکه مفیدی (۱۳۸٦) و علیجانی و همکاران (۱۳۹۰)

گزارش نموده اند، ضمن تقویت پشته/ پرارتفاع جنب حاره ای بر روی خاورمیانه، گسترش شمال و شرق سوی پشته را بر روی نیمه شرقی خاورمیانه موجب می گردد. اگر چه در تحقیقات یاد شده، ساز و کار فوق به عنوان محرّک اولیه گردش حاره ای در جنوب آسیا و در نهایت افزایش فعالیت سامانه های بارش زا در جنوب شرق ایران قلمداد گردیده است، اما به نظر می رسد چنین الگویی بطور همزمان می تواند با افزایش گردش واچرخندی در ترازهای زیرین در محدوده شمال شرق ایران (شکل۲-f)، ضمن گسترش زبانه‌های پرفشار بر جانب شرقی دریای خزر، پایداری لازم را جهت بروز روزهای بسیار آلوده در مشهد نیز فراهم سازد. نکته دیگری که تعلّق الگوی پشته جنب حاره ای را به دوره گرم سال آشکار می سازد، آن است که، علیرغم تاوایی منفی بالا (شکل۲-e) و تسلط جریانات قائم پایین سوی گسترده و نسبتاً قوی در ترازهای میانی جو (شکل۳-f)، در این الگو، بواسطه گرمایش سطحی بالا در این زمان از سال، میزان نزول هوا در سطح زمین ناچیز می باشد. مقادیر متوسط صعود و نزول هوا در نیمرخ های قائم، به خوبی این ویژگی را نشان می دهند (شکل۳-e و ۳-f).

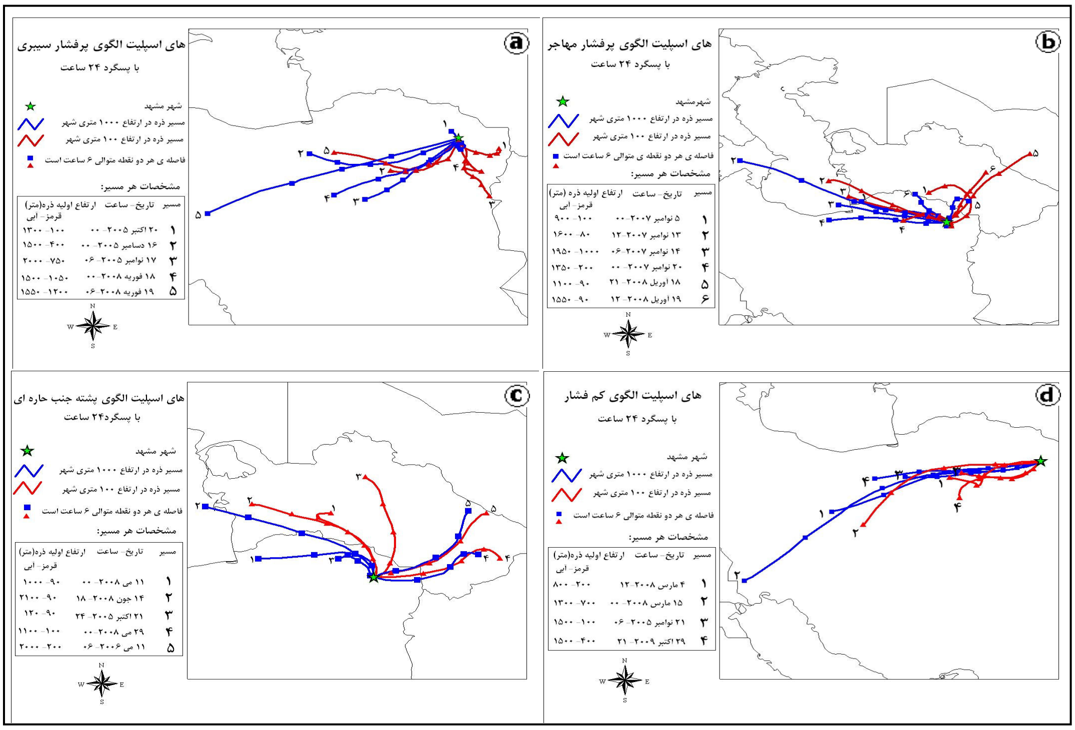
ردیابی مسیر ذرات معلق بر روی شهر مشهد در زمان استقرار الگوی پشته جنب حاره ای، نقش برجسته ی این پشته را به نحو مطلوبتری آشکار می سازد. با توجه به خروجی های مدل *HYSPLIT*، ذرات معلق ردیابی شده چه در ارتفاع ۱۰۰ متری و چه در ارتفاع ۱۰۰۰ متری از سطح زمین، یک مسیر انتقال واچرخندی را به تبعیت از پشته جنب حاره ای به سوی مشهد طی می نمایند. بر این اساس، ذرات معلق ورودی به مشهد، با توجه به نحوه استقرار پشته جنب حاره ای، از قطاع شمالی (از شمال شرق تا شمال غرب) به سوی مشهد انتقال می یابند (شکل٤-c).

٤. ١. ٤. الگوی کم فشار

الگوی کم فشار، ٥ روز از روزهای بسیار آلوده مشهد را به خود اختصاص داده است (جدول۳). در قیاس با سه الگوی دیگر، الگوی کم فشار از ساختار گردش کاملاً متفاوتی برخوردار است. بدین معنی که، در الگوی کم فشار، آلودگی های حدّی مشهد ناشی از استقرار پشته و یا مرکز گردش واچرخندی و به تبع آن پایداری گسترده و نزول فراگیر هوا نبوده، بلکه برعکس، در این الگو بواسطه عبور یک چرخند عمیق برون حاره، شمال شرق کشور از جوی کژفشار و ناپایدار برخوردار است. در این الگو، عبور ناوه ای نسبتاً عمیق از نیمه شمالی کشور در ترازهای میانی (شکل۲-g)، با شکل گیری و جابجایی شرق سوی یک مرکز گردش چرخندی در ترازهای زیرین جو همراه گردیده است (شکل۲-h). ناوه یادشده، بواسطه نفوذ یک موج کوتاه و عمیق شدن آن در منطقه خزری شکل گرفته و در زمان استقرار خود، بطور همزمان توسط یک پشته نسبتاً قوی در شرق، پشته ای در غرب و پشته جنب حاره ای در جنوب کنترل گردیده است (شکل۲-g). شرایط همدید یادشده، حرکت جنوب سوی ناوه را محدود نموده است. با این وجود، مقادیر تاوایی مثبت در تمامی ترازهای میانی و زیرین جو بطور برجسته ای بر جانب شرقی دریای خزر افزایش یافته، بطوریکه شهر مشهد در محدوده گردش چرخندی واقع گردیده است. بررسی وضعیت صعود و نزول هوا بر روی خاورمیانه، حکایت از آن دارد که در این الگو، تمامی مناطق واقع در جانب شرقی طول ۵۵° شرقی (شکل۳-g) و جانب شمالی عرض ۲۷° شمالی (شکل۳-h)

صعود گسترده ای را تجربه می نمایند. با این وجود، به جهت محدود شدن گسترش جنوب سوی ناوه در منطقه شمال شرق کشور، میزان صعود هوا در محدوده شهر مشهد در پایین ترین ترازهای جو قابل توجه نمی باشد(شکل۳).

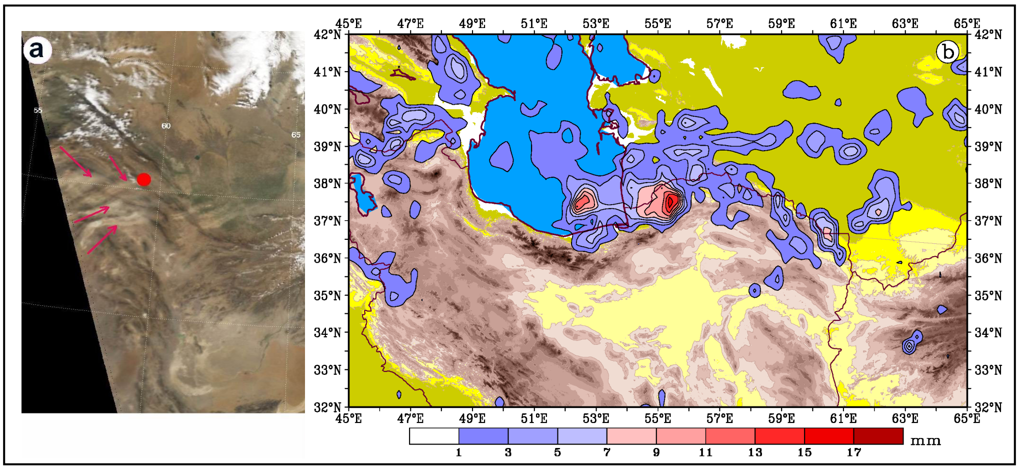
ردیابی پسگرد ذرات معلق در مدل*HYSPLIT*، بیانگر الگوی مشابهی از مسیر ذرات در هر دو ارتفاع ۱۰۰ و ۱۰۰۰ متری از سطح زمین می باشد. در واقع خروجی های مدل برای این الگو، تسلط جریانات چرخندی را بر مسیر حرکت ذرات در منطقه شمال شرق ایران نشان می دهد که در نتیجه آن ذرات یک مسیر غرب–جنوب غربی را برای رسیدن به مشهد طی می نمایند (شکل٤–d). به منظور فراهم نمودن درک مناسب تری از شرایط حاکم در الگوی کم فشار و آشکار نمودن تفاوت بنیادی این الگو در قیاس با سایر الگوها، شکل ۵ تهیه گردیده است. در شکل۵–a منطقه شمال شرق ایران، به واسطه جابجایی شرق سوی یک چرخند برون حاره (در تصویر مشاهده نمی شود)، پدیده گردوغبار را تجربه می نماید.



شکل٤ ردیابی ذرات معلق به روش پسگرد به تفکیک برای روزهای متعلق به چهار الگوی همدید در زمان وقوع آلودگی های حدی در مشهد. (a) پرفشار سیبری–پشته جنب حاره ای (b) پرفشارهای مهاجر (c) پشته جنب حاره و (d) الگوی کم فشار. علامت ستاره در تمامی شکل ها موقعیت شهر مشهد را نشان می دهد. ذرات در شهر مشهد برای ارتفاع ۱۰۰ متری (خط قرمز) و ۱۰۰۰ متری (خط آبی) از سطح زمین از زمان اوج آلودگی تا ٢٤ ساعت قبل در حدفاصل زمانی ٦ ساعت ردیابی شدند. در جدول مربوط به هر الگو، مشخصات روزهای آلوده، همچنین ارتفاع ذرات در زمان پایان ردیابی (٢٤ ساعت قبل) به تفکیک آورده شده است

نتیجه کلی این که، عبور چرخندهای برون حاره از محدوده شرق دریای خزر، سبب افزایش ناپایداری و صعود هوا در شمال شرق ایران می گردند. امّا به جهت محدودیت درگسترش جنوب سوی سامانه های چرخندی و فراهم نبودن شرایط

مناسب جهت تغذیه رطوبتی سامانه ها در الگوی یادشده، شاهد برخاستن گردوغبار و شکل گیری پدیده گردوغبار و افزایش غلظت ذرات معلق در این تیپ گردش خواهیم بود. نکته جالب دیگر آن که، در برخی از روزهای بسیار آلوده از تیپ کم فشار، بارش های کم و پراکنده ای نیز در مناطق واقع در شمال شرق کشور مشاهده می گردد. شکل۵–b مقادیر متوسط بارش روزانه برای دو روز از روزهای بسیار آلوده از تیپ کم فشار را نشان می دهد.



شکل ۵ (a) پدیده گردوغبار در منطقه شمال شرق ایران در زمان عبور یک سامانه کم فشار از روی دریای خزر در روز ۱۵ مارس ۲۰۰۸ (ساعت۸:۳۰ دقیقه گرینویچ). موقعیت شهر مشهد در تصویر با دایره قرمز رنگ مشخص گردیده و فلش های قرمز رنگ پدیده گردوغبار را در یک حرکت شرق سو نشان می دهند. (b) مقادیر متوسط بارش روزانه (میلی متر) برای دو روز بسیار آلوده در الگوی کم فشار. در تهیه نقشه از داده های بارش روزانه TRMM استفاده شد.(منبع داده: http://mirador.gsfc.nasa.gov)

۲. ٤. تحلیل ترمودینامیک روزهای بسیار آلوده

بررسی ساختار گردش جو در مقیاس همدید منجر به استخراج چهار الگوی همدید اصلی برای روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد گردید. در این بخش از تحقیق با استفاده از داده های جو بالای ایستگاه مشهد (داده های رادیوسوند) و بهره گیری از برخی داده های مکمل، ویژگی های ترمودینامیکی جو در روزهای بسیار آلوده به تفکیک برای چهار الگوی گردشی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج این بخش می تواند درکی عمیق تر از ساز و کار حاکم بر آلودگی های حدّی در شهر مشهد فراهم نماید. شکل٦ وضعیت پایداری و ناپایداری جو و نوع و ارتفاع لایه وارونگی را در نمودارهای اسکیوتی برای ایستگاه جو بالای مستقر در فرودگاه مشهد نشان می دهد. بررسی نمودار اسکیوتی مربوط به الگوی پرفشار سیبری–پشته جنب حاره ای، شکل پیچیده ای از لایه های وارونگی را به نمایش می گذارد. بدین معنی که استقرار پرفشار سیبری منجر به شکل گیری یک لایه وارونگی نسبتاً کم ضخامت در حدفاصل تراز ۸۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال گردیده است. در عین حال، استقرار پشته در ترازهای میانی جو و نزول بی در رو خشک در لایه های میانی وردسپهر، موجب

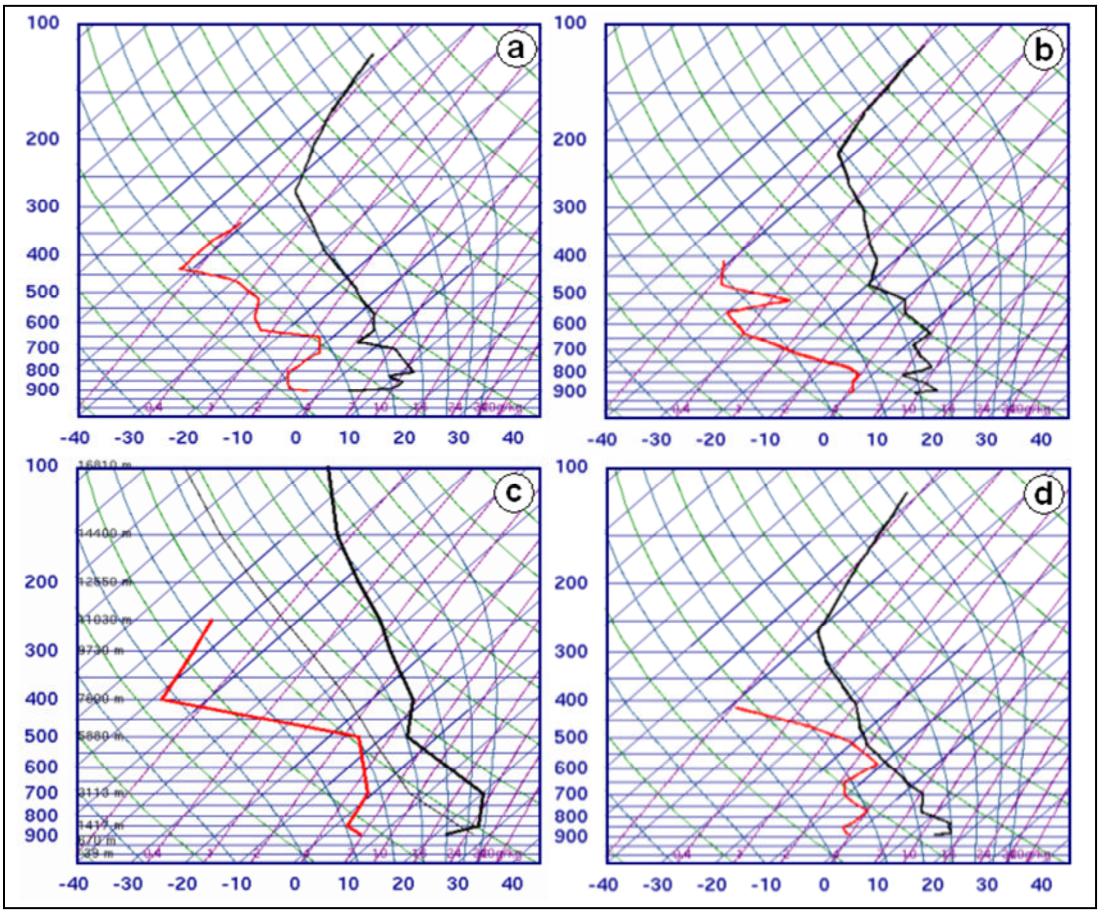
شکل گیری لایه وارونگی دیگری (وارونگی دینامیکی حاصل از نزول هوا) در حدفاصل تراز ۵۵۰ تا ٦۵۰ هکتوپاسکال گردیده است. از نظر شکل، وارونگی دمایی ایجاد شده در ترازهای میانی، یک نمونه برجسته از تیپ وارونگی سوبسیدانسی یا وارونگی حاصل از فرونشینی(*Subsidence Inversion*) است که در هوای خشک، پایدار و بدون ابر ایجاد شده و از مشخصه های بارز آن، کاهش ناگهانی، همزمان و قابل ملاحظه ی رطوبت هوا در محدوده لایه وارونگی است (سرویس هواشناسی ملی، ۱۹۹۰). علاوه بر لایه های وارونه یاد شده، سرمایش تابشی حاصل از خروج طول موج بلند زمین تاب در ساعات اولیه صبح (ساعت ٤ صبح به وقت محلی)، تشکیل لایه وارونگی دیگری را در پایین ترین تراز جو و در تماس با سطح زمین، در الگوی پرفشار سیبری– پشته جنب حاره ای در پی داشته است (شکل٦–a). مقایسه منحنی دمای نقطه شبنم (خط قرمز) با منحنی دمای هوا، مبیّن عدم وجود ابر و خشکی قابل ملاحظه ی هوا در الگوی پرفشار سیبری–پشته جنب حاره ای است. بدین ترتیب در الگوی پرفشار سیبری–پشته جنب حاره ای، ترکیب پیچیده ای از وارونگی های دما در تراز زیرین و تراز میانی، سبب پایداری جو و افزایش بیش از حد غلظت آلاینده ها را در شهر مشهد گردیده است.

بررسی نمودار اسکیوتی مربوط به الگوی پرفشار مهاجر ساختار متفاوتی را در نیمرخ قائم نمایان می سازد. بدین معنی که در زیر تراز ٤۰۰ هکتوپاسکال شاهد شکل گیری همزمان چند لایه کم ضخامت وارونگی به ترتیب در محدوده تقریبی٤۷۰، ٥٦۰، ٦۸۰ و ۸۰۰ هکتوپاسکال هستیم (شکل٦–b). کاهش نسبتاً سریع دما در حدفاصل لایه های وارونه، نشان از وجود شدت و ضعف در میزان نزول هوا بر روی منطقه دارد. از سویی،کاهش مداوم رطوبت هوا در منحنی نقطه شبنم (خط قرمز) و عدم تطابق آن با منحنی دمای هوا، جبهه ای بودن لایه های وارونگی را منتفی می سازد (مرکز آموزش سرویس هوای ملی، ۲۰۰۰). بر این اساس، افزایش بیش از حد آلودگی هوا در این الگو، حاصل نزول بی در رو خشک هوا (خط قرمز در شکل٦–b) در زیر تراز ٤۰۰ هکتوپاسکال تا سطح زمین می باشد.

نمودار اسکیوتی مربوط به الگوی پشته جنب حاره ای، یک الگوی بسیار برجسته و مشخص از تیپ وارونگی سوبسیدانسی را به نمایش می گذارد (شکل٦–c). در این الگو، اگر از وارونگی کم ضخامت مماس با سطح زمین، ناشی از سرمایش تابشی حاصل از خروج طول موج بلند زمین تاب در ساعات اولیه صبح، صرفنظر کنیم، می بایست بطور مشخص نزول دینامیکی حاصل از استقرار پشته/پرارتفاع جنب حاره ای بر روی شمال شرق ایران را عامل اصلی پیدایش وارونگی دما در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و به تبع آن پایداری جو و شکل گیری روزهای بسیار آلوده در دوره گرم سال بدانیم (شکل٦–c).

در نهایت نمودار اسکیوتی مربوط به الگوی کم فشار، علیرغم آن که وارونگی دمایی ضعیفی را در حدفاصل تراز ۷۰۰ تا ۸۰۰ هکتوپاسکال نشان می دهد، اما بطور کلی فاقد یک لایه وارونگی مشخص و قوی در نیمرخ ارتفاعی می باشد. در مقابل، مماس شدن منحنی دمای نقطه شبنم به منحنی دمای هوا در محدوده ۵۰۰ تا ٦۰۰ هکتوپاسکال، نشان از به اشباع رسیدن هوا، رطوبت بالا، ابرناکی و ناپایداری جو دارد. به عبارتی، در الگوی کم فشار، علیرغم ضعیف تر بودن ناپایداری در

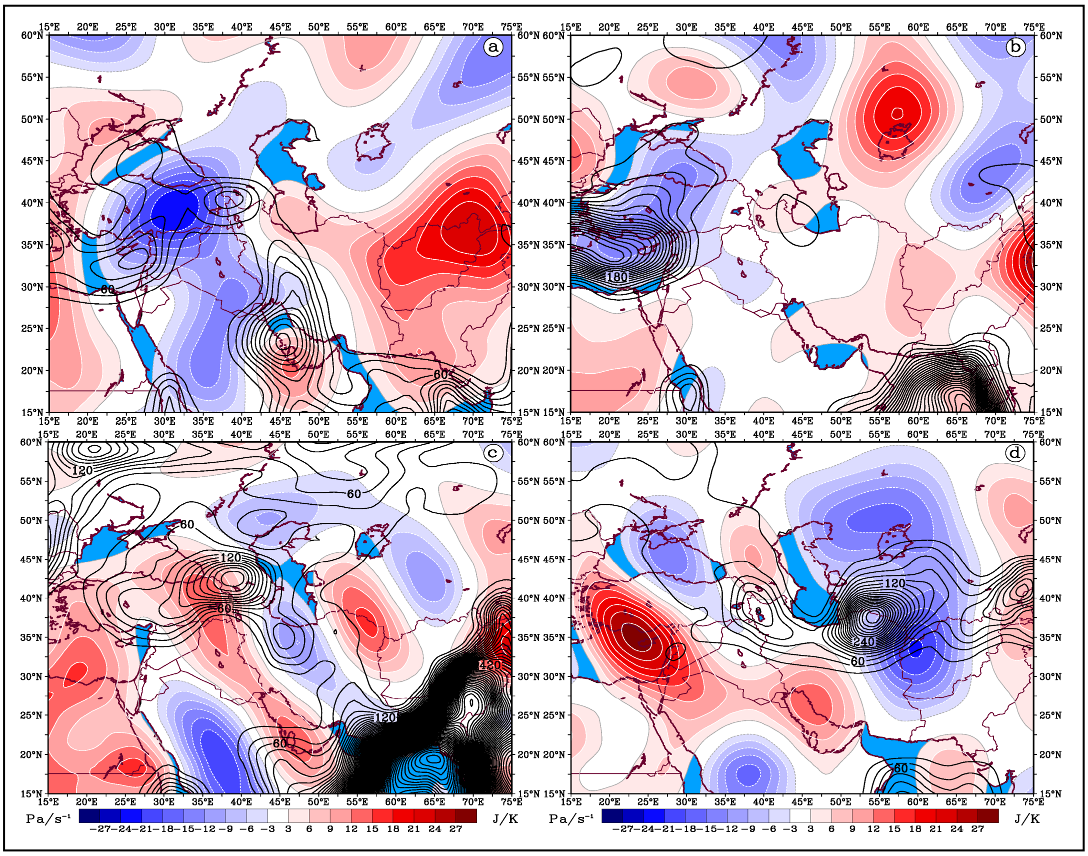
ترازهای پایین جو، در ترازهای میانی شاهد ناپایداری و صعود هوا هستیم (شکل٦-d). نتیجه چنین شرایطی، همانطوری که در شکل ۵ نیز مشاهده شد، بروز ناپایداری های محلی و منطقه ای، همراه با ایجادگردوغبار و در مواردی وقوع بارش های پراکنده در شمال شرق کشور می باشد.



شکل٦ نمودارهای اسکیوتی-logP (لگاریتمی فشار) برای ایستگاه مشهد، به ترتیب برای چهار الگوی (a) پرفشار سیبری-پشته جنب حاره ای (b) پرفشار مهاجر (c) پشته جنب حاره و (d) الگوی کم فشار. هر یک از نمودارها با متوسط گیری از داده های جو بالای ساعت 00.00 گرینویچ (ساعت چهار صبح به وقت محلی) برای تمامی روزهای مربوط با آن الگو تهیه شد. در تمامی نمودارها، خط های ضخیم سیاه و قرمز به ترتیب معرّف دمای هوا و دمای نقطه شبنم می باشند. (منبع داده ها: http://weather.uwyo.edu)

در ادامه جهت تبیین تفاوت های ترمودینامیکی موجود بین چهار الگوی گردشی، از مقادیر انرژی پتانسیل همرفتی در دسترس (CAPE) به همراه مقادیر سرعت قائم در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال استفاده شد. بکارگیری این پارامتر می تواند تمایز بین الگوهای همدید منجر به آلودگی های حدّی در شهر مشهد را از منظر ترمودینامیک به نحو مناسب تری آشکار سازد. به ویژه با در نظر گرفتن این نکته که استقرار الگوی کم فشار با ناپایداری قابل ملاحظه در ترازهای میانی جو همراه گردیده

است (شکل ٦-d). شکل۷-a مقادیر متوسط انرژی پتانسیل همرفتی در دسترس (CAPE) و مقادیر متوسط صعود و نزول هوا در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال را برای الگوی پرفشار سیبری-پشته جنب حاره ای نشان می دهد.



شکل۷ نقشه های ترکیبی مقادیر متوسط سرعت قائم (رنگ ها $\times 10^{-2}\ Pa\ s^{-1}$) در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و انرژی پتانسیل همرفتی دردسترس (کنتورها $J\ kg^{-1}$) به ترتیب برای چهار الگوی (a) پرفشار سیبری-پشته جنب حاره ای (b) پرفشار مهاجر، (c) پشته جنب حاره و (d) الگوی کم فشار، در زمان وقوع آلودگی های حدّی در مشهد

با توجه به شکل، نزول گسترده هوا در منطقه شمال شرق ایران، به شدت از ناپایداری هوا جلوگیری نموده، که به تبع آن انرژی موجود جهت شکل گیری فعالیت های همرفتی در ستون جو بر روی شمال شرق ایران به پایین ترین میزان خود رسیده است. این در حالی است که استقرار ناوه در شرق مدیترانه (شکل۲-a)، منطقه گسترده ای از حرکت قائم بالاسو را بر جانب غربی خاورمیانه ایجاد نموده و علاوه بر آن، مقادیر انرژی پتانسیل قابل ملاحظه ای را جهت وقوع فعالیت های همرفتی در منطقه خلیج فارس و شمال غرب ایران در معرض استفاده قرار داده است. شکل های۷-b و۷-c شرایط مشابهی را به ترتیب برای الگوهای پرفشار مهاجر و پشته جنب حاره ای نشان می دهند. با این تفاوت که، در الگوی پرفشار مهاجر مرکز اصلی نزول هوا کمی بالاتر و در عرض °۵۰ شمالی مشاهده می گردد. در این رابطه، به نظر می رسد ارتباط تنگاتنگی بین نحوه شکل گیری لایه های وارونگی دما در الگوی پرفشار مهاجر (شکل٦-b) و استقرار مرکز

اصلی نزول هوا در عرض های بالاتر وجود داشته باشد (شکل۷–b). بدین معنی که، در الگوی پرفشار مهاجر، شهر مشهد، عمدتاً درحاشیه جنوبی پشته/ پرفشار مهاجر برون حاره ای جای گرفته و همین امر از شدت و گستردگی جریانات نزولی در این منطقه کاسته است. برخلاف سه الگوی فوق، الگوی کم فشار، پتانسیل بالایی از فعالیت همرفتی را در زمان بروز آلودگی های حدّی در شهر مشهد به نمایش گذاشته است (شکل۷–d). صعود گسترده هوا در تمامی مناطق واقع در شرق خزر و نیمه شرقی ایران با مقادیر بالای انرژی پتانسیل همرفتی (بیشینه۵۰۰ ژول بر کیلوگرم) همراه گشته و بدین ترتیب ساختار گردشی متفاوتی از جمله ناپایداری قابل ملاحظه (شکل٦–d)، همچنین بارش های پراکنده (شکل۵–b) و وقوع گردوغبار (شکل۵–a) را در شمال شرق کشور رقم زده است.

۵. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر نقش گردش منطقه ای جو و الگوهای فشار مقیاس همدید در بروز روزهای بسیار آلوده درکلانشهر مشهد مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، ابتدا ویژگی های کلی آلودگی هوای شهر مشهد ارزیابی شد و سپس سازوکار حاکم بر وقوع دوره های آلودگی حدّی در این شهر با بهره گیری از یک روش ترکیبی مبتنی بر تحلیل های همدید، ترمودینامیکی و ردیابی پسگرد ذرات معلق، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بررسی های انجام شده یافته های زیر را در پی داشته است:

– یافته ها نشان داد که تمامی روزهای همراه با آلودگی حدّی در مشهد (۲۳ روز) در قالب ٤ الگوی همدید قابل تبیین می باشند. بر این اساس، می توان چنین نتیجه گیری نمود که بروز آلودگی های حدّی در مشهد بیش از آن که ریشه در عوامل محلی داشته باشد، حاصل برهمکنش شرایط محلی با گردش جو در مقیاس منطقه ای است. به عبارتی، شهر مشهد تنها زمانی روزهای بسیار آلوده را تجربه خواهد نمود که گردش منطقه ای جو شرایط مناسب برای افزایش غلظت آلاینده ها را فراهم نماید.

– با وجود آن که پرفشار سیبری در تعدادی از روزهای مورد مطالعه در بروز آلودگی های حدّی در مشهد نقش داشته است، اما بطورکلی، عامل اصلی پیدایش روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد، الگوهای همدید و ساختار گردش جو در ترازهای میانی (گردش در جو آزاد) دانسته شده است.

– یافته ها بیانگر آن است که پشته ی جنب حاره ای از نقش برجسته ای در بروز آلودگی های حدّی در شهر مشهد برخوردار است. سامانه گردشی یادشده، مجموعاً در بیش از نیمی از روزهای بررسی شده سبب پیدایش غلظت های بالای آلودگی در شهر مشهد گردیده است. این نتیجه از این جهت حائز اهمیت است که تحقیقات گذشته در رابطه با آلودگی هوای شهرهای ایران، عمدتاً سامانه های برون حاره را عامل اصلی افزایش غلظت آلاینده ها و بروز آلودگی هوا در شهرهای ایران معرفی نموده اند. در واقع یافته های پژوهش حاضر، متفاوت با نتایج تحقیقات پیشین، که بر نقش بلامعارض و برجسته ی سامانه های برون حاره بطور عام و

واچرخندهای مهاجر بطور خاص، بر وقوع آلودگی در شهرهای ایران تاکید نموده اند (علیجانی،۱۳۸٤؛ انتظاری، ۱۳۸٤؛ قسامی و همکاران، ۱۳۸٦؛ جهانشیری، ۱۳۸۹؛ حسین پور، ۱۳۹۰)، بر تقسیم این نقش بین سامانه های برون حاره (واچرخندهای مهاجر و چرخندها) از یک سو و سامانه های جنب حاره ای (پشته جنب حاره) از سوی دیگر، تأکید دارد.

– نتایج پژوهش حاضر نشان داد که شکل گیری شرایط ناپایدار به واسطه عبور چرخندها می تواند افزایش غلظت آلاینده ها را در شهر مشهد تا فراتر از مرز اضطرار در پی داشته باشد. به عبارتی، نمی توان برای تمامی روزهای آلوده در مشهد، وجود یک جو پایدار و تسلط پدیده وارونگی دمایی را به عنوان یک پیش شرط پذیرفت.

– میزان نقش و سهم ٤ الگوی همدید استخراج شده در این تحقیق، تابعی از زمان و فصل سال می باشد. توضیح بیشتر آن که، در اوج دوره سرد، آلودگی های حدّی ایجاد شده در شهر مشهد عمدتاً ناشی از تسلط سامانه های برون حاره ای (واچرخندهای مهاجر و چرخندها) می باشد. در مقابل، پیدایش روزهای بسیار آلوده در فصول انتقالی (ابتدای پائیز و انتهای فصل بهار) و در دوره گرم سال، عمدتاً ناشی از تقویت و گسترش شمال سوی سامانه های جنب حاره ای (پشته جنب حاره) است.

– کاربست تؤامان تحلیل همدید دستی، ردیابی پسگرد ذرات معلق و بررسی شرایط ترمودینامیک جو (رویکرد تحلیل همدید ترکیبی)، درکی عمیق تر و درعین حال دقیق تر از سازوکار حاکم بر وقوع آلودگی های حدّی در شمال شرق ایران فراهم نموده است. رویکرد یادشده از منظر روش شناسی موفق عمل نموده و کارایی مطالعات ترکیبی را آن چنان که در برخی پژوهش های پیشین مدنظر قرار گرفته (دیویس و همکاران، ۲۰۱۰)، تأیید می نماید.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر بخشی از یک طرح پژوهشی است که مورد حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد قرار گرفته است،که بدین وسیله سپاس گزاری می شود. نویسندگان مقاله همچنین از کارشناسان سازمان حفاظت محیط زیست خراسان رضوی، بویژه جناب آقای مهندس صباحی و سرکارخانم مهندس معظمی فرد به جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات و داده های ایستگاه های سنجنده آلودگی هوای شهر مشهد تشکر می‌نمایند. از سرکار خانم لیلا گلزاری نیز به جهت پی گیری در فراهم نمودن داده های آلودگی سپاسگزاری می شود.

کتابنامه

اصیلیان، حسن، قانعیان، محمد تقی، و غنی زاده، قادر، (۱۳۸٦)، آلودگی هوا، تهران، نشر میترا، ۱۹۹ ص.

انتظاری ، علیرضا، (۱۳۸٤)، مطالعه آماری و سینوپتیکی آلودگی هوای تهران، رساله دکتری جغرافیای طبیعی-گرایش اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه تربیت معلم تهران.

بیدختی، عباسعلی و شرعی پور، زهرا، (۱۳۸۸)، شرایط هواشناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هـوا (مطالعـه مـوردی: شـهر تهران)، محیط شناسی،۵۲: ١٤-١.

جهانشیری، مهین، (۱۳۸۹)، بررسی آماری و سینوپتیکی آلودگی هوای مشهد، پایان نامه کارشناسی ارشد جغرافیـای طبیعـی- اقلیم شناسی، به راهنمایی علیرضا انتظاری، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار.

حجازی جویباری، آزاده، (۱۳۸۷)، بررسی آلودگی هوا و ارزیابی کیفیت هوا در اصفهان، پایان نامه کارشناسـی ارشـد فیزیـک، بـه راهنمایی اسماعیل حسن زاده، دانشگاه اصفهان، اصفهان.

حسین پور، زینب، (۱۳۹۰)، تحلیل همدیـدی آلـودگی هـوای شـهر تهـران بـا تاکیـد بـر ذرات معلـق (PM_{10})، پایـان نامـه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی- اقلیم شناسی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران به راهنمایی علی اکبر شمسی پور.

حسین زاده، سیدرضا، دوستان، رضا، حقیقت ضیابری، سیدمرضیه، و حقیقت ضـیابری، سـید مـریم، (۱۳۹۲)، بررسـی الگوهـای همدید مؤثر بر آلودگی هوا در کلان شهر مشهد، جغرافیا و توسعه ناحیه ای، ۲۱: ۸۱-۱۰۱.

ذوالفقاری، حسن، صحرایی، جلیل، شاقبادی، فرياد، و جليليان، آذر، (۱۳۹۳)، تحلیلی بر جنبه های سینوپتیکی-دینـامیکی آلـودگی هوا در کرمانشاه، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹: ٩٦-٧٥.

روزنامه شهرآرا، (۱۳۹۱)، طرح جامع کاهش آلودگی هوای مشهد؛ دستورالعمل هست، بودجـه نیـست! دوشـنبه ۲۲مهـر، شـماره ٩٦٩، ص ۲.

رنجبر سعادت آبادی، عباس و محمدیان، لیلا، (۱۳۸۹)، مطالعه میانگین الگوهای همدیدی بر اساس رخداد غلظت هـای مختلـف آلاینده CO در فصول تابستان و پائیز در تهران، پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۷۲: ۱۲۸-۱۱۱.

سایت تابناک، (۱۳۹۱)، مصاحبه با مشاور وزیـر بهداشـت جنـاب آقـای آقاجـانی، گـزارش شـماره ۲۹۵۷٦۷: ١٦دی مـاه ۱۳۹۱، (http://www.tabnak.ir/fa/news/295767).

صفوی، سید یحیـی و علیجـانی، بهلـول، (۱۳۸۵)، بررسـی عوامـل جغرافیـایی در آلـودگی هـوای تهـران، پـژوهش هـای جغرافیایی، ۵۸: ۱۱۲-۹۹.

عزتیان، ویکتوریا، (١٣٨٦)، بررسی تأثیر عوامل هواشناسی بر روی شاخص کیفیت هوا در شهر اصـفهان، رسـاله دکتـری جغرافیـای طبیعی-اقلیم شناسی، گروه جغرافیای دانشگاه اصفهان به راهنمایی جواد خوشحال دستجردی.

عطایی، هوشمند، و هاشمی نسب، سادات، (۱۳۹۰)، شناسایی و تجزیه و تحلیل الگوهای تراز میانی جو مـؤثر در آلـودگی هـوای شهر اصفهان، مجله پژوهش و برنامه ریزی شهری، ۲ (٤): ۱۱۲-۹۷.

علیجانی، بهلول، (۱۳۸۱)، اقلیم شناسی سینوپتیک، انتشارات سمت، صص ۲۰-۵.

علیجانی، بهلول، (۱۳۸۲)، شناسایی تیپ های هوایی مؤثر برآلودگی هوای تهران، سومین کنفـرانس منطقـه ای و اولـین کنفـرانس ملی تغییر اقلیم، ۲۹ مهر تا ۱ آبان، دانشگاه اصفهان.

علیجانی، بهلول، (١٣٨٤)، رابطه بین توزیع فشار و تراکم آلاینده ها در تهران، پژوهش های جغرافیایی، ۵۱: ۱۵۱-١٤١.

علیجانی، بهلول و نجفی نیک، زهرا، (۱۳۸۸)، بررسی الگوهای سینوپتیکی اینورژن در مشهد بـا اسـتفاده از تحلیـل عـاملی، مجلـه جغرافیا و توسعه ناحیه ای، ۱۲: ۱۲-۱.

علیجانی، بهلول، مفیدی، عباس، جعفرپور، زین العابدین، و بیدختی، عباسعلی، (۱۳۹۰)، الگوهای گردش جو بارش های تابستانه جنوب شرق ایران در ماه جولای۱۹۹٤، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۷ (۳): ۲۲۷-۲۰۵.

فهیمی فرد، سید محمد، و افشار، فهیمه، (۱۳۸۹)، بررسی و اندازه گیری آلودگی هوای شهر مشهد، دومین کنفرانس برنامه ریزی و مدیریت شهری، ۲۹ و ۳۰ اردیبهشت ماه، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱٤ صفحه.

قربانی، محمد، و فیروز زارع، علی، (۱۳۸۸)، ارزش‌گذاری ویژگی‌های مختلف آلودگی هوا در مشهد، مجله تحقیقات اقتصادی، ۸۹: ۲٤۱-۲۱۵.

قسامی، طاهره، بیدختی، عباسعلی، صداقت کردار، عبدالله، و صحرائیان، فاطمه، (۱۳۸٦)، بررسی شرایط همدیدی حاکم در چند دوره بحرانی آلودگی هوای شهر تهران، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۹ (۳): ۲۳۸-۲۲۹.

کریمی، صادق، (۱۳۹۱)، بررسی پیوند بین گردش اتمسفری در مقیاس همدید و تغییرات غلظت ازون تروپوسفری در کلانشهر تهران، رساله دکتری جغرافیای طبیعی-اقلیم شناسی، گروه جغرافیای دانشگاه سیستان و بلوچستان.

گلریز ضیائی، زهرا، صادقی، حمید، معتمدی، محمد، و ژاله رجبی، میترا، (۱۳۹۰)، پیش بینی، ارزشگذاری و ترسیم نقشه آلودگی هوای شهر مشهد؛ مطالعه موردی گاز منوکسید کربن، اولین کنفرانس اقتصاد شهری ایران, مشهد، ۲ و ۳ آذر ماه.

لشکری، حسن و هدایت، پریسا، (۱۳۸۵)، تحلیل الگوی اینورژن شدید شهر تهران، پژوهش های جغرافیایی، ٥٦: ۸۲-٦٥.

مفیدی (۱۳۸٦) تحلیل گردش جو تابستانه بر روی جنوب غرب آسیا و ارتباط آن با بارش های تابستانه جنوب شرق ایران، رساله دکتری جغرافیای طبیعی-گرایش اقلیم شناسی، دانشگاه تربیت معلم تهران، گروه جغرافیا، ۱٦٥ص.

موسوی، محمد، بحرپیما، سارا، و رضازاده، رضا، (۱۳۸۲)، بررسی آلودگی هوای ناشی ازسه نیروگاه موجود در شهر مشهد با استفاده از مدل گوس، چهارمین همایش ملی انرژی، کمیته ملی انرژی جمهوری اسلامی ایران، تهران، ۹ صفحه.

منصوری، نبی الله، و علی نژاد، جواد، (۱۳۸۸)، بررسی کارآیی سیستم های کنترل کننده ذرات معلق و تعیین میزان انتشار در کارخانجات آسفالت مشهد، علوم و تکنولوژی محیط زیست ،۱۱ (۱): ۹-۱.

مهندسان مشاور فرنهاد، (۱۳۸۷)، طرح توسعه و عمران (جامع) کلانشهر مشهد مقدس؛ مطالعات پایه محیط طبیعی، وزارت مسکن و شهرسازی، شهرداری مشهد، ۱٦۷ص.

واثقی، الهه، و زیبایی، منصور، (۱۳۸۷)، پیش بینی آلودگی هوای شیراز، محیط شناسی، سال سی و چهارم، ٤۷: ۷۲-٦٥.

Air Weather Service., 1990. The Use of the Skew-T, log P Diagram in Analysis and Forecasting. Technical report, AWS/TR-79/006, Scott Air Force Base, Illinois 62225-5008, 164 pp.

Aliakbari Bidokhti, A.A., and Shareipoor, Z., 2009. Meteorological conditions of upper atmosphere and critical air pollution periods; (case study: Tehran). Journal of Environmental studies 35 (52), 1-14.

Alijani, B., 2002. Synoptic Climatology. 1st edition, SAMT Publication, Tehran, 5-20.

Alijani, B., 2003. Identification of weather types related to Tehran air pollution. Proceeding of 3rd regional and 1st national conference on Climate Change, October 21, 2003, University of Isfahan, Isfahan.

Alijani, B., 2005. The relationships between pressure distribution and pollutants concentration in Tehran city. Geographical Research 51, 141-151.

Alijani, B., and Najafi-e-Neek, Z., 2009. Investigation of Synoptic patterns related to occurrence of temperture Inversion in Mashhad using Factor Analysis. Geography and Regional Development 12, 1-12.

Alijani, B., Mofidi, A., Aliakbari Bidokhti, A.A., and Jafarpour, Z., 2012. Atmospheric Circulation patterns of summer rainfalls in the Southeast of Iran during July 1994. Journal of Earth and Space Physics 37(3), 205-227.

Aseeliyan, H., Ghaneiyan, M.T., and Ghanizadeh, Gh., 2007. Air Pollution. Mitra Publication, Tehran, 199p.

Ataei, H., and Hashemi-Nasab, S., 2011. Identification and Analysis of mid-troposphere pressure patterns related to Isfahan city Air pollution. Journal of Research and Urban Planning, 2(4). 97-112.

Baker, J., 2010. A cluster of long range air transport pathway and associated pollutant concentration within the UK. Atmos. Environ., 44, 563-571.

Cheng, C.S., Campbell, M., Li, Q., Li, G., Auld, H., Day, N., Pengelly, D., Gingrich, S., and Yap, D., 2007. A synoptic climatological approach to assess climatic impact on air quality in south-central Canada, Part I: historical analysis. Water, Air, and Soil Pollution, 182, 131–148.

Chen, Z.H., Cheng, S.Y., and Li, J.B., Guo, X.R., Wang, W.H., and Chen, D.S., 2008. Relation between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China. Atmos. Enviorn., 42, 6078-6087.

Cheng, W.L., Pai, J.L., Tsuang, B.J., and Chen, C.L., 2001. Synoptic patterns in relation to ozone concentrations in west-central Taiwan. Meteorol. Atmos. Phys., 78, 11–21.

Comrie, A.C., 1990. The climatology of surface ozone in rural areas: a conceptual model. Progress in Physical Geography 14, 295–316.

Comrie, A.C., and B. Yarnal, 1992. Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania. Atmos. Environ., Part B, 26, 301–312.

Comrie, A.C., 1996. An All-Season Synoptic Climatology of Air Pollution in the U.S.-Mexico Border Region. The Professional Geographer 48 (3), 237-251.

Davis, R. E., Kalkstein, L. S., 1990. Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations. Phys. Geogr., 11, 320-342.

Davis, RE., Normile, CP., Sitka, L., Hondula, DM., Knight, DB., Gawtry, SP., and Stenger, PJ., 2010. A comparison of trajectory and air mass approaches to examine ozone variability. Atmos. Environ., 44(1), 64-74.

Dayan, U., and Levy, I., 2002. Relationship between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations over Israel, J. Geophys. Res., 107(D24), 4813, doi:10.1029/2002JD002147.

Diem, J.E., Hursey, M.A., Morris, I.R., Murray, A.C., and Rodriguez, R.A., 2010. Upper-Level Atmospheric Circulation Patterns and Ground-Level Ozone in the Atlanta Metropolitan Area. J. Appl. Meteorol., Climatol., 49, 2185-2196.

Doswell, C. A., III, and E. N. Rasmussen, 1994. The effect of neglecting the virtual temperature correction on CAPE calculations. Wea. Forecasting, 9, 625–629.

Draxler RR., and Rolph GD., 2011. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). Model access via NOAA ARL READY Website

(http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT. php). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

Entezari, A., 2005. Statistical and Synoptic study of Tehran air pollution. PhD dissertation of Physical geography, Department of Geography, Tarbiat Moallem University, Tehran.

Ezzatiyan, V., 2007. Investigating the influence of meteorological factors on air quality conditions in Isfahan city. PhD dissertation of climatology, Faculty of Geography, University of Isfahan. Isfahan.

Fahimi-Fard, S.M., and Afshar, F., 2010. Investigation and measurement of air pollution in the Mashhad city. Proceeding of 1st National Conference on Urban Planning and Management, May 19-20, 2010, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, 14p.

Farnahad Architecture and Urbanism Consulting, 2008. Comprehensive plan for development of holly Mashhad metropolitan, basic environmental studies. Funded by Ministry of Urban planning and Construction, Mashhad Municipality, 167p.

Flocas, H. Kelessis, A. Helmis,C., Petrakakis, M., Zoumakis, M., and Pappas, K., 2009. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area, Theor. Appl. Climatol., 95(3-4), 265-277.

Greene, J.S., Kalkstein, L.S., Ye, H., 1999. Relationships between synoptic climatology and atmospheric pollution at 4 US cities, Theor. Appl. Climatol., 62, 163–174.

Ghassami, T., Aliakbari Bidokhti, A.A., Sedaghat-Kerdar, A., and Sahraeyan, F., 2007. Investigation of Synoptic conditions during several critical episodes of air pollution in Tehran. Journal of Environmental Science and Technology, 9 (3), 229-238.

Ghorbani, M., and Firooz-Zare, A., 2009. Evaluating the different characteristics of air pollution in Mashhad, Economic Research Journal, 89, 215-241.

Golriz Ziaee, Z., Sadeghi, H., Motamedi, M., Jaleh-Rajabi, M., (2011). Prediction, Evaluation and mapping of Mashhad air pollution distribution, Case study; CO pollutant. Proceeding of 1st Iranian conference on Urban Economies, November 23-24, 2011, Mashhad.

Heidorn, K. C., and Yap, D., 1986. A synoptic climatology for surface ozone concentrations in southern Ontario 1976– 1981, Atmos. Environ., 20, 695–703.

Hejazi-Jooybari, A., (2008). Air pollution investigation and air quality evaluation in Isfahan. MS. Thesis of Physics, Department of Physics, University of Isfahan. Isfahan.

Hoseinpoor, z., 2011. Synoptic analysis of air pollution in Tehran (with emphasis on suspended particles PM_{10}). MA. Thesis of climatology. Faculty of geography, Tehran University, Tehran.

Hosseinzadeh, SR., Doostan, R., Haghighat Zeyabari, SM., and Haghighat Zeyabari, SM., 2013. Investigating the synoptic patterns of air pollution in Mashhad metropolis, Geography and Regional Development 21, 81-101.

Hu, Y., Chang, M.E., Russell, A.G., and Odman, M.T., (2010). Using synoptic classification to evaluate an operational air quality forecasting system in Atlanta. Atmospheric Pollution Research, 1, 280–287, DOI:10.5094/APR.2010.035.

Jahanshiri, M., 2010. A Synoptic and Statistical investigation of Mashhad air pollution. MA. Thesis of climatology, Faculty of Geography and Environmental sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar.

Kalkstein, L. S., and Corrigan, P. R., 1986. A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations. Annals of the

Association of American Geographers, 76, 381-395.

Kalkstein, L.S., Nichols, M.C., Barthel, D.C., and Greene, S.J., 1996. A new spatial synoptic classification: Application to air-mass analysis, Int. J. Climatol., 16, 983-1004.

Kalnay, E., and 21-Co-Authors, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, Bull. Amr. Met. Soc., 77, 437-471.

Karimi, S., 2012. Investigating the relation between Synoptic scale atmospheric circulation and the variations of tropospheric Ozone concentration in Tehran Metropolitan. PhD dissertation of climatology, Faculty of Geography and Regional Planning, Sistan and Baluchistan University, Zahedan.

Keim, B. D., Meeker, L.D., and Slater, J.F., 2005. Manual synoptic climate classification for the east coast of New England (USA) with an application to $PM_{2.5}$ concentration, Climate Res., 28, 143–153.

Kistler, R., and 16-CoAuthors, 2001. The NCEP/NCAR 50-Year Reanalysis Project, Bull. Amr. Met. Soc., 82, 246-267.

Lam, K. C., and S. Cheng, 1998. A synoptic climatological approach to forecast concentrations of sulfur dioxide and nitrogen oxides in Hong Kong, Environ. Pollution 101, 183–191.

Lashkari, H., and Hedayat, P., 2006.The analysis of synoptic patterns of severe Inversions in Tehran. Geographical Research 56, 65-82.

Mansouri, N., and Ali-Nejad, J., 2009. Investigation on dust control systems and determination of emission rate in Mashhad asphalt plants. Journal of Environmental Science and Technology 11 (1). 1-9.

McGregor, G. R., and Bamzelis, D., 1995. Synoptic typing and its application to the investigation of weather air pollution relationships, Birmingham, United Kingdom, Theor. Appl. Climatol., 51 (4), 223-236.

Mofidi, A., 2007. The Analysis of Summer Atmospheric Circulation over Southwest Asia and its Relation to Summer Rainfall in Iran Plateau, PhD. Dissertation of Physical geography (climatology). Department of Geography, Kharazmi University, Tehran, 165p.

Moncrieff, M. W., and Miller, M. J., 1976. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 102; 373–394.

Mosavi, M., Bahr-Peyma, S., and Reza-Zadeh, R., (2003). Investigation of air pollution resulted by three power plants in Mashhad using Goss model. Proceeding of 4th national meeting of energy, Islamic Republic of Iran national committee of energy, Tehran, 9 pages.

National Weather Service Training Center (NWSTC). 2000. Skew-T, Log P Diagram and Sounding Analysis, RTM –230, Kansas City, MO 64153, 45 pp.

Nilsson, E. D., Paatero, J., and Boy, M., (2001). Effects of air masses and synoptic weather on aerosol formation in the continental boundary layer. Tellus B, 53, 462-478.

O'Hare, G.P., and Wilby, R.L., 1995. Ozone pollution in the United Kingdom: an analysis using Lamb circulation types, Geographical Journal, 161, 1–20.

Ranjbar Saadat-Abadi, A., and Mohammadian, L., 2010. Investigation of predominant Synoptic patterns related to different CO pollutant concentrations in Summer and Autumn seasons in Tehran. Physical Geography Research Quarterly, 72, 111-128.

Ranjbar Saadat-Abadi, A., Mohammadian, L., and Vazifeh, A., 2012. Controls on air

pollution over a semi-enclosed basin, Tehran: A synoptic climatological approach, Iranian Journal of Science & Technology, A4, 501-510.

Safavi, S.Y., and Alijani, B., 2006. Investigation of geographical factors impact on Tehran air pollution. Geographical research, 58, 99-112.

Schwarzhoff, P.J., and Reid, P.D., 2000. Classification of meteorological patterns associated with the ozone categories in Kelowna, British Columbia, J. Appl. Meteorol., 39, 463–470.

Shahgedanova, M., Burt, T.P., and Davies, T.D., 1998. Synoptic Climatology of Air Pollution in Moscow, Theor. Appl. Climatol., 61(1-2), 85-102.

Shahr-Ara Newspaper, 2012. Comprehensive plan for reducing the air pollution in Mashhad. Report no. 969, Monday Oct 13, 2012, Page 2.

Sindosi, O.A, Katsoulis, B.D, and Bartzokas, A., (2003). An objective definition of air mass types affecting Athen, Greece; the corresponding atmospheric pressure pattern s and air pollution levels, Enviornmental technology, 24(8), 947-962.

Sando, T.R., 2011. A climatology of air pollution in the Kansas city metropolitan area, M.A. thesis, Kansas State University, http://krex.kstate.edu/dspace/ bitstream/handle/2097/ 11987/ThomasSando 2011.pdf? sequence=3

Sheridan, SC., 2002. The redevelopment of a weather-type classification scheme for North America. Int. J. Climatol., 22, 51–68.

Stunder, B.J.B., 1997. NCEP Model Output –FNL ARCHIVE DATA, TD-6141, Prepared for National Climatic Data Center (NCDC). This document and archive grid domain maps are also available at http://www.arl.noaa.gov/ss/transport/archives.html.

Taabnak, 2012. Interview with Counselor of Health Minister Mr. Aghajani. Report no. 295767, January 5, 2013, http://www.tabnak.ir/fa/news/295767.

Tanner, P.A., and Law, P.T., 2002. Effects of synoptic weather systems upon the air quality in an Asian megacity, Water, Air, & Soil Pollution, 136, 105–124.

United States Environmental Protection Agency (US-EPA). 1978. Rapid techniques for calculating the pollutant standards index (PSI). EPA--600/4-78-002, 68 pp.

United States Environmental Protection Agency (US-EPA). (1998). Guideline for Reporting of Daily Air Quality-Pollutant Standards Index (PSI). EPA Draft, Office of Air Quality Planning and Standards, North Carolina 27711, 28 pp.

Vaseghi, E., and Zibaei, M., 2008. Prediction of Shiraz air pollution. Journal of Environmental Sciences, 47, 65-72.

Wang, L.-L., Wang, Y.-S., and Li, Y.-Y., 2010. Synoptic typing and its application for evaluating climatic impact on air quality in Urumqi, Atmos, Oceanic Sci. Lett., 3 (6), 312–318.

World Health Organization (WHO). 2011. The Top 10 Most Air Polluted Cities in the World, written by M. L. Goldberg, UN Dispatch, 26 Sep. 2011, Available at http://www.undispatch.com/the-top-10-most-air-polluted-cities-in-the-world-are.

Yarnal, B., (1993). Synoptic Climatology in Environmental Analysis, Belhaven press, 1-18.

Yarnal, B., Comrie, A.C., Frakes, B., and Brown, D.P., 2001. Developments and prospects in synoptic climatology, Int. J. Climatol., 21, 1923–1950.

Yuen, C.Y., et al., 1998 Synoptic weather patterns associated with No_x pollution episodes in Hong Kong urban areas, Proceedings of the air & Waste management Association's Annual Meeting & Exhibition, 9p.

Ziomas, I., Melas, D., and Zerefos, C.S., 1995. Forecasting peak pollutant levels from meteorological variables, Atmos. Environ., 29, 3703–3711.

Zolfaghari, H., Sahraei, J., Shahghobadi, F., and Jalilian, A., 2014. Analysis on synoptic and dynamical aspects of air pollution in Kermanshah city, Geography and Environmental Hazards 9, 75-96.